

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY**

**Měření optických vlastností luminoforových filmů nanesených
na podkladu z polydimethylsiloxanu
Measurement of Optical properties of Luminophore's Films
Coated on a Substrate from Polydimethylsiloxane**

2018

Adrian Poláček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Adrian Poláček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Měření optických vlastností luminoforových filmů nanesených na
podkladu z polydimethylsiloxanu
Measurement of Optical Properties of Luminophore's Films Coated on a
Substrate from Polydimethylsiloxane

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Ukazuje se, že luminofory v polymerových matricích mohou nacházet uplatnění v různých odvětvích a aplikacích. Na Katedře telekomunikační techniky se tato problematika řeší už delší dobu s polymerem polydimethylsiloxanem. Vzhledem k aktuálnosti a potenciálu tohoto tématu je třeba ověřovat každý technologický krok měřením vlastností luminoforu v polydimethylsiloxanové matrici. Vaše úkoly pro tuto bakalářskou práci budou proto následující:

1. Nastudujte a popište základní teorii týkající se oblasti luminoforů, vzniku bílého světla a polymerů se zaměřením na polydimethylsiloxan.
2. Návrhněte postupy měření a měřicí sestavy pro měření optických vlastností luminoforu v polydimethylsiloxanové matrici nanesené na polydimethylsiloxanovém podkladu
3. Proveďte jednotlivá měření a jejich následná statistická vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

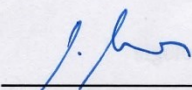
- 1) PELANT, Ivan a Jan VALENTA. *Luminiscenční spektroskopie. 1, Objemové krystalické polovodiče*. Vyd. 1. Praha : Academia, 2006. 327 s. ISBN 80-200-1447-0.
- 2) DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání [online]. VŠCHT v Praze, 2006. Dostupné online. ISBN 80-7080-617-6.
- 3) SCHUBERT, E. Fred. *Light-Emitting Diodes*. Second edition. New York : Cambridge University Press, 2006. 422 s. ISBN-10 0-511-34476-7.

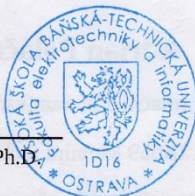
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

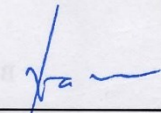
Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Jan Jargus**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa 29.06.2018

.....*Polášek*.....
Podpis autora

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval Mgr. Janovi Jargusovi za odbornú pomoc a konzultácie pri tvorbe tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Cieľom tejto práce bolo vytvorenie vzoriek tenkého filmu luminiscenčnej vrstvy nanesej na čistý polydimethylsiloxan (PDMS) a následne skúmanie vlastností tejto vrstvy zloženej z luminoforu a PDMS matrice. Luminofor sme budili modrou LED diódou a zaznamenávali sme spektrum a farebnú korelovanú teplotu (correlated color temperature - CCT) výsledného svetla. Pritom nás zaujímalo, ako tieto charakteristiky ovplyvní zmena koncentrácie luminoforu v PDMS matrici a tiež sme zisťovali, či sa pri zmene teploty vzoriek budú meniť namerané hodnoty CCT.

K tejto práci sme potrebovali modrú LED diódu, merané vzorky, napájací zdroj, multimeter, elektrickú pec, v ktorej sme zohrievali jednotlivé vzorky, útlmový člen, spektrometer, optický kábel, upevňovacie konštrukcie od firmy Thorlabs a software SpectraSuite nainštalovaný na osobnom počítači.

Kľúčové slová: PDMS, luminofor, LED, CCT

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is to create samples of thin film of the luminescent layer applied to pure polydimethylsiloxane (PDMS) and then to examine properties of this layer composed of luminophore and PDMS matrix. The luminophore was excited by a blue LED and we recorded the spectrum and the correlated color temperature (CCT) of the resultant light. At the same time, we were interested in how these characteristics will affect the change in luminophore concentration in the PDMS matrix, and we also determined whether the measured values of CCT would change when the sample temperature changes.

For this bachelor thesis we needed a blue LED, measured samples, power supply, multimeter, electric furnace in which we heated individual samples, attenuator, spectrometer, optical cable, Thorlabs fastening structures and SpectraSuite software installed on a personal computer.

Key words: PDMS, luminofor, LED, CCT

OBSAH

Zoznam značiek a skratiek	9
Zoznam ilustrácií a tabuliek	10
Úvod	12
1 Polyméry.....	14
1.1 Všeobecná charakteristika polymérov	14
1.2 História polymérov.....	14
1.3 Rozdelenie polymérov.....	15
1.3.1 Rozdelenie polymérov podľa pôvodu	15
1.3.2 Rozdelenie polymérov podľa štruktúry makromolekulárneho reťazca	16
1.3.3 Rozdelenie polymérov podľa chovania voči zmene teploty.....	16
1.3.4 Rozdelenie polymérov podľa tvaru molekuly	17
1.3 Výhody a nevýhody polymérov a ich využitie.....	17
1.4 Polydimethylsiloxan.....	17
1.4.1 Polydimethylsiloxan Sylgard 184	18
2 LED Dióda.....	20
2.1 PN priechod.....	20
2.2 Charakteristika LED diódy.....	20
2.2.1 Opis LED diódy	20
2.2.2 Druhy LED diód.....	21
2.3 Elektromagnetické spektrum.....	23
2.3.1 Viditeľné spektrum.....	23
2.4 Farebná teplota	24
2.4.1 Rozdelenie farby bieleho svetla	24
2.5 Voltampérová charakteristika diódy	24
3 Luminofory.....	26
3.1 Všeobecná charakteristika luminoforov	26
3.2 História luminoforov	26
3.3 Teplota chromatickosti.....	27
3.3.1 Kolorimetria	27
3.4 Korelovaná teplota farby	29
3.5 Žiarenie absolútne čierneho telesa	30

3.6 Biele svetlo.....	30
4 Vlastné meranie	32
4.1 Postup výroby vzoriek.....	32
4.1.1 Príprava matrice z PDMS.....	32
4.1.2 Príprava vzoriek luminoforu na PDMS podklade	32
4.2 Meracia sústava	33
4.2.1 Použité prístroje.....	33
4.3 Postup merania	38
4.3.1 Postup merania LED diódy	38
4.3.2 Postup merania spektra luministnej vrstvy	40
4.3.3 Postup merania bieleho svetla závislého na teplote	41
4.3.4 Vzorka 1:5	42
4.3.5 Vzorka 1:10	42
4.3.6 Vzorka 1:15	43
4.3.7 Vzorka 1:20	44
4.3.8 Vzorka 1:25	45
4.3.9 Vzorky 1:30; 1:35; 1:40	46
Záver.....	48
Použitá literatúra.....	49

Zoznam značiek a skratiek

CCT – Korelovaná teplota farby

cP – Centipoise

CT – Farebná teplota

DC– Jednosmerné napätie

EP –Polyuretán

EUPUR –Polyuretánová pena

FP –Fenolformaldehydová živica

PC –Polykarbonát

PE – Polyetylén

PP – Polypropylén

PS – Polystyrén

PVC –Polyvinylchlorid

RGB – Red, Green, Blue

Zoznam ilustrácií a tabuliek

- Obr.1: Schéma makromolekuly
- Obr.2: Základné delenie polymérov z hľadiska ich chovania za bežnej a zvýšenej teploty
- Obr.3: Schematické znázornenie makromolekuly
- Obr.4: Chemický vzorec polydimethylsiloxanu
- Obr.5: Chemický vzorec polydimethylsiloxanu Sylgard 184
- Obr.6: PN priechod, ľavá polovica typ P, pravá polovica typ N
- Obr.7: Zloženie diódy
- Obr.8: Ultrafialová LED
- Obr.9: Infračervená LED
- Obr.10: Jednofarebné LED
- Obr.11: RGB LED
- Obr.12: Laserová dióda
- Obr.13: Stupnica teploty chromatickosti
- Obr.14: Voltampérová charakteristika diódy
- Obr.15: Fosforescencia
- Obr.16: Hodnoty jednotlivých funkcií RGB
- Obr.17: Diagram chromatickosti
- Obr.18: CIE 1976 (u^*, v^*) jednotný diagram chromatickosti
- Obr.19: Planckovo žiarenie
- Obr.20: Spôsoby vzniku bieleho svetla
- Obr.21: Blokovo schéma zapojenia
- Obr.22: Napájací zdroj Statron
- Obr.23: Multimeter UT70B
- Obr.24: Teplomer DT-613
- Obr.25: Elektrická pec
- Obr.26: LED dióda s označením OSUB5111P
- Obr.27: Optické vlákno M45L02
- Obr.28: Spektrometer USB4000
- Obr.29: Útlmový člen spolu s držiakom
- Obr.30: Graf voltampérovej charakteristiky
- Obr.31: Graf závislosti výkonu od napätia
- Obr.32: Graf závislosti prúdu od teploty
- Obr.33: Graf závislosti výkonu od teploty
- Obr.34: Graf: spektrum luminiscenčnej vrstvy
- Obr.35: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:5
- Obr.36: Diagram chromatickosti vzorky 1:5
- Obr.37: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:10
- Obr.38: Diagram chromatickosti vzorky 1:10
- Obr.39: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:15
- Obr.40: Diagram chromatickosti vzorky 1:15
- Obr.41: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:20
- Obr.42: Diagram chromatickosti vzorky 1:20
- Obr.43: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:25

Obr.44: Diagram chromatickosti vzorky 1:25

Obr.45: Diagram chromatickosti vzorky 1:30

Obr.46: Diagram chromatickosti vzorky 1:35

Obr.47: Diagram chromatickosti vzorky 1:40

Tabuľka 1: Farba odpovedajúcej vlnovej dĺžke

Tabuľka 2: Parametre multimetru UNI-T typu UT70B

Tabuľka 3: Parametre LED diódy s označením OSUB5111P

Tabuľka 4: Parametre spektrometru OceanOptics USB4000

Tabuľka 5: Parametre útlmového členu

Úvod

V dnešnej dobe sa čoraz viac používajú plasty a luminofory. Najčastejšie sa využívajú ako obaly na potraviny, nádoby na vodu, svietidlá a iné. Aj napriek modernej technológii nie sú preskúmané všetky možnosti ich využitia. Z tohto dôvodu sa táto práca zaoberá ich vlastnosťami, pričom sa konkrétne zaoberáme materiálom Polydimethylsiloxan (PDMS).

Cieľom bakalárskej práce je zistiť ako sa menia vlastnosti (spektrum a farebná korelovaná teplota) pri vrstve luminoforu s PDMS v rôznych koncentráciách nenesenej na podklade čistého PDMS budená modrou LED diódou.

V prvej kapitole charakterizujeme polyméry, akým spôsobom vznikajú, ich rozdelenie a využitie. Opisujeme aj konkrétny PDMS, ktorý sme používali, a to Polydimethylsiloxan Sylgard 184.

V ďalšej kapitole sme priblížili fungovanie LED diód, charakterizovali sme rozdelenie farby bieleho svetla, ktoré sme následne potrebovali v praktickej časti.

V tretej kapitole sme sa zaoberali luminoformi a ich spôsobu fungovania. Ďalej sme sa zaoberali akým spôsobom sa určuje farebná teplota.

V poslednej časti prebehlo samotné merania a následne na základe nameraných hodnôt aj vyhodnotenie jednotlivých vzoriek ich grafov a vlastností.

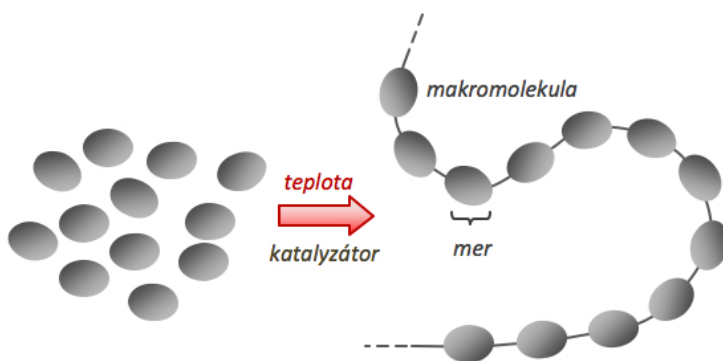
1 Polyméry

Termín „*polymér*“ pochádza z starovekého gréckeho slova „*polus*“, čo znamená „*veľa*“ a „*meros*“, čo znamená „*časť*“ a vzťahuje sa na molekulu, ktorej štruktúra je zložená z viacerých opakujúcich sa jednotiek charakteristickými vysokou relatívnou molekulovou hmotnosťou a sprievodnými vlastnosťami [1].

1.1 Všeobecná charakteristika polymérov

Polymér je z chemického hľadiska makromolekulárna látka prírodného alebo syntetického pôvodu, ktorá sa používa na popis veľkých molekúl, inak nazývaných aj makromolekula. Makromolekuly sú spájané z veľkého počtu opakujúcich sa identických skupín atómov zvaných monoméry (vid Obr.1). Články, ktoré sa opakujú v reťazci, sa nazývajú mery, čo je základná konštitučná jednotka. Spojením 2-10 monomérov vzniká oligomer a molekula spojená s 10 a viac monomérov sa nazýva makromolekula. V publikácií *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití* sú polyméry charakterizované nasledovne: „Polyméry sú chemické látky, nezvyčajná šírka vlastností, obsahujúce vo svojich obrovských molekulách väčšinou atómy uhlíka, vodíka a kyslíka, často dusíku, chlóru a iných prvkov. Polyméry sú vo forme výrobku prakticky v tuhom stave, ale v určitom štádiu spracovania v stave v podstate kvapalnom, dovoľujúcim, väčšinou za zvýšenej teploty a tlaku, udeliť budúcemu výrobku najrôznejší tvar, podľa predpokladaného použitia“ [2].

Ducháček (2006) taktiež opisuje makromolekulu ako stavebnú časticu polyméru, monomer ako látku, ktorej molekuly majú schopnosť spojovať sa za vhodných podmienok v makromolekuly a mer ako opakujúcu sa jednotku v makromolekule polyméru, ktorej chemické zloženie odpovedá zloženiu molekuly príslušného monomeru [2].



Obr.1: Schéma makromolekuly

Zdroj: Polymery, 2016

1.2 História polymérov

Označenie plasty je odvodené z gréckeho slova „*plassein*“, čo znamená tvarovať. Samotný začiatok používania polymérov nie je presne zaznamenaný, pričom niektorí vedci tvrdia, že informácie o polyméroch sú zachytené už v Starom zákone, kde je popísané používanie prírodných materiálov v podobe lepidiel či náterov. Počas storočí používali ľudia prírodné organické polyméry vo forme vosku

a živice a samotné plasty na základe chemicky modifikovaných prírodných polymérov boli objavené až v 19. storočí[3].

Prvým prírodným polymérom, ktorý mal obchodné využitie, bola gutaperča. V roku 1843 si malajský lekár Dr. William Montgomerie všimol, že tamojší domorodci z nej vyrábajú rukoväte k nožom a bičov. Živica, ktorá z gutaperče vytekala, bola po narezaní z niektorých stromov zbieraná a využívaná k vedeckému skúmaniu a následne posielaná na priemyselné spracovanie do Anglicka. Známy fyzik Michael Faraday zistil, že gutaperča je výborným izolantom elektrického prúdu, a to aj v prostredí kvapalnej vody. Na základe týchto objavov v roku 1848 Ernest Werner z firmy Siemens ako prvý použil gutaperču na izoláciu podmorských telegrafných káblov[4]. Ďalšími dôležitými historickými medzníkmi boli v tejto oblasti napr. objav prírodného kaučuku Európanmi v roku 1493, objavenie bakelitu Baekeland L.H v roku 1907, teoretické pochopenie štruktúry polymérov H. Staudingerom v roku 1920, za ktoré získal aj Nobelovu cenu, výroba polyvinylchloridu PVC v roku 1925, výroba polystyrénu v rokoch 1936 – 1938 a iné [5].

1.3 Rozdelenie polymérov

Rozdelenie polymérnych materiálov do skupín je pomerne zložitú. Nakoľko polyméry majú vysoko variabilnú chemickú štruktúru, a tým aj svoje vlastnosti, je rozdelenie podľa univerzálneho kritéria prakticky nemožná.

1.3.1 Rozdelenie polymérov podľa pôvodu

Polyméry sa rozdeľujú podľa rôznych kritérií, napríklad podľa pôvodu na: **prírodné polymérne materiály**, kde patria napríklad polysacharidy (celulóza, škrob), bielkoviny, kaučuk, guma, celofán a iné a na **syntetické polymérne materiály**, kde patria polyetylén, polystyrén, epoxid, polytetrafluóretylén.

Syntetické polymérne materiály vznikajú troma základnými chemickými reakciami, a to polymerizáciou, polykondenzáciou alebo polyadíciou. **Polymerizácia** je reťazová chemická reakcia veľkého počtu molekúl monoméru, vznikajú pri nej makromolekuly polyméru. Pri tejto reakcii sa nevytvárajú vedľajšie produkty, chemické zloženie polyméru je rovnaké ako chemické zloženie monoméru. Produktom polymerizácie je makromolekulárny reťazec, ktorý narastá do svojej konečnej dĺžky vo veľmi krátkej dobe, napr. PE,PP,PS,PVC a iné. **Polykondenzácia** je sled rovnakých opakujúcich sa reakcií funkčných skupín východiskových látok. Ku vzniku polymérov je treba, aby východiskové zlúčeniny mali potrebný počet funkčných skupín, a to najmenej dva v každej molekule vzájomne reagujúce komponenty. V takom prípade vzniká lineárny polymér. Ak má niektorá východisková látka viac funkčných skupín v molekule, vznikajú produkty zo štruktúrou priestorovej siete ako napr. PC,FP, kaučuky a iné[2]. Vo publikácii Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování z roku 2006 je uvedené, že: „Polykondenzácia je reakcia, pri ktorej vzniká z dvoch nízkomolekulárných látok polymér a nejaká iná nízkomolekulárna látka, väčšinou voda“[2]. **Polyadícia** je reakcia, pri ktorej vznikne makromolekulárna látka adíciou východiskovej látky. Pri tejto reakcii nevznikne vedľajšia nízkomolekulárna zlúčenina. Polyadíciou vznikajú napríklad polyuretány z diisokyanátov a glykolov [6]. Zloženie finálneho produktu pri adícii je rovnaké ako zloženie východiskovej zmesi, napr. EP, EUPUR a iné [7].

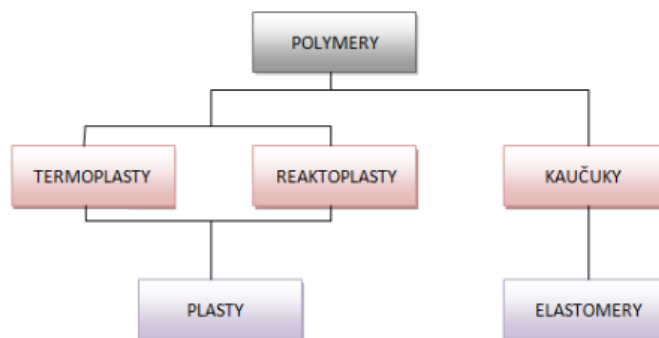
1.3.2 Rozdelenie polymérov podľa štruktúry makromolekulárneho reťazca

Niektoré makromolekulárne reťazce sú tvorené len mermi jedného druhu, ktoré sa nazývajú homopolymery. Polyméry s makromolekulárnym reťazcom, ktorý obsahuje mery rôznych druhov, sa nazývajú **kopolymery**. Tie sa delia na štatistické, ktorých reťazce sú tvorené nepravidelne, ďalej blokové, ktoré sú tvorené dvoma alebo viac početnými blokmi jedného druhu a vrúbľované, ktoré majú základný reťazec jedného druhu a postranný reťazec iného druhu[2].

1.3.3 Rozdelenie polymérov podľa chovania voči zmene teploty

Polyméry podľa chovania voči zmene teploty delíme na elastoméry a plasty. Plasty sú polyméry, ktoré sú za bežných podmienok väčšinou tvrdé a často aj krehké. Pri zvýšenej teplote sa stávajú plastickými a tvarovateľnými. Ak je zmena z plastického do tuhého stavu vratná, nazývame ich termoplasty. Pokiaľ ide o zmeny nevratnú, sú výsledkom chemickej reakcie (za zvýšenej teploty), hovoríme o reaktoplastoch [2].

Elastoméry sú vysoko elastické polyméry. Za bežných podmienok pri zaťažovaní malou silou je možné ich deformovať bez porušenia. Jedná sa o deformáciu vratnú. Do elastomérov sa radia hlavne kaučuky, z ktorých sa vyrába guma(vid. Obr.2)[7].



Obr.2: Základné delenie polymérov z hľadiska ich chovania za bežnej a zvýšenej teploty

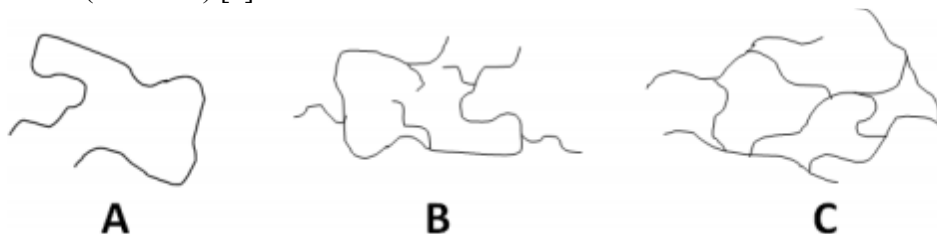
Zdroj: Hemmelová, 2014

Termoplasty sú polymérne materiály, ktoré pri vyšších teplotách prechádzajú do formy vysoko viskózne kvapaliny (vo väčšine prípadov pseudoplastickej), ktorú možno tvarovať a následným ochladením stabilizovať jej tvar. Tento proces je opakovateľný, to znamená, že polymér možno opätovným zahriatím uviesť do plastického stavu a znovu tvarovať. Termoplasty sa za bežných teplôt správajú ako tuhé telesá. Do tejto skupiny patria napr. polyetylén, polypropylén, polyamid a iné.

Reaktoplasty sú typy polymérov, ktoré nadobúdajú konečné vlastnosti až po zosieťovaní. Husté zosieťované polymérne štruktúry, v ktorých sú makromolekulové reťazce pospájané kovalentnými väzbami, vznikajú pôsobením siet'ovacích činidiel (vytvrdzovadlá) alebo účinkom tepla. V procese vytvrdzovania sa tvarujú na tvar výrobku a po ukončení vytvrdzovacej chemickej reakcie sú tvarové zmeny nevratné. Vzniknuté polyméry sú netaviteľné a nerozpustné, nevykazujú prakticky žiadnu elastickú deformáciu a nie je možné uviesť ich opätovne do plastického stavu. Reaktoplasty sú napr. polyesterové, epoxidové, fenolformaldehydové živice a iné [8].

1.3.4 Rozdelenie polymérov podľa tvaru molekuly

Polyméry podľa zoradenia merov v makromolekule sa delia na lineárne (A), ktoré majú mery radené jednotlivo za sebou a tvoria tak jednoduchý reťazec, ďalej rozvetvené (B), ktoré sú tvorené hlavným reťazcom, z ktorého vychádza reťazec vedľajšej, tzv. vetvy a jeho štruktúra má menšiu hustotu ako u lineárneho, a zosieťované (C) zložené z monomérov, ktoré majú trojitú kovalentnú väzbu a tvoria tak trojrozmernú sieť (vid' Obr.3) [9].



Obr.3: Schematické znázornenie makromolekuly

Zdroj: TheMerna Group, 2018

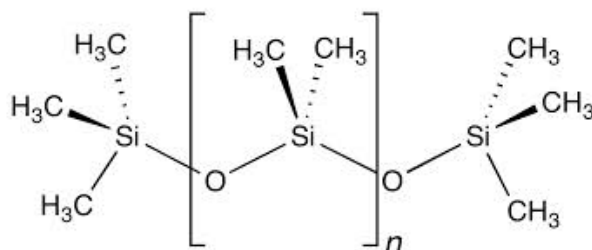
1.3 Výhody a nevýhody polymérov a ich využitie

Veľkou výhodou polymérov je nižšia hustota oproti iným materiálom, t.j. majú menšiu hmotnosť, čo je výhodou napríklad v automobilovom priemysle (menšia spotreba paliva). Polyméry sú tepelné izolanty, elektrické izolanty, majú odolnosť proti korózií, chemickú odolnosť, ľahké spracovanie a iné. Naopak najväčšími nevýhodami u väčšiny polymérov sú vlastnosti ako horľavosť, nízka odolnosť UV žiarenia, rozťahujú sa pri zväčšení teploty, vytvárajú elektrostatický náboj a iné [8].

Polyméry majú v súčasnosti rôzne využitie, používajú sa v strojárstve, elektrotechnike, elektronike, stavebníctve, nábytkárstve, textilnom priemysle, obchode, ako inteligentné materiály, ale aj v domácnostiach a iných oblastiach. Gutaperča ako prírodný polymér je stomatologickým výplňovým materiálom, ktorý sa používa na zaplnenie koreňových kanálikov v rámci endodontickej liečby [9].

1.4 Polydimethylsiloxan

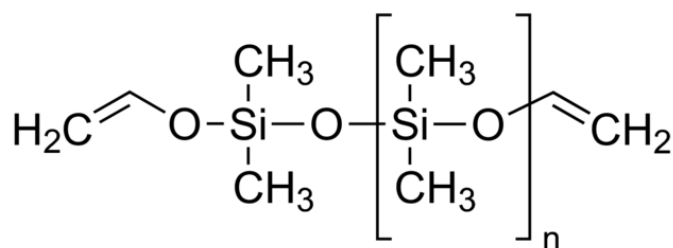
Polydimethylsiloxán (ďalej len „PDMS“) alebo dimethicon, dimetylpolysiloxán je široko používaný polymér. Je to minerálny organický polymér zo skupiny siloxánov (slovo odvodené od kremíka, kyslíka a alkánu), pričom obsahuje uhlík a kremík (vid' Obr.4). Tento polymér patrí do skupiny polymérnych organokremičitých zlúčenín, ktoré sa bežne označujú ako silikóny. PDMS je opticky čistý a vo všeobecnosti inertný, netoxický a nehorľavý. Okrem toho sa používa ako prísada do potravín (E900), v šampónoch a ako prostriedok proti peneniu v nápojoch alebo v mazacích olejoch. Pri výrobe mikrofluidných zariadení sa PDMS (kvapalina) zmiešaná so sieťovacím činidlom naleje do mikroštruktúrovanej formy a zahrieva, čím sa získa elastomérna replika formy (PDMS zosieťovaná) [10].



Obr. 4:Chemický vzorec polydimethylsiloxanu
Zdroj:Elveflow, 2018

1.4.1 PolydimethylsiloxanSylgard 184

Oficiálny názov Sylgard® 184 SiliconeElastomer od firmy DowCorningje dvojzložkový zapuzdrovač(vid' Obr.5). Je toelastomér, ktorý poskytuje tekutosť do doby k jeho zosieťovaniu (tepelnému vytvrdnutiu), je odolný voči plameňu a má dobré dielektrické vlastnosti. Sylgard 184 sa skladá zo základnej zložky - vytvrdzovacieho činidla v pomere zmesi 10:1.



Obr.5:Chemický vzorec polydimethylsiloxanuSylgard 184
Zdroj: Sigmaaldrich/Merck, 2018

Sylgard 184 je číry, stredne viskózný kvapalný silikón, ktorý bol vyvinutý pre zalievanie a zapuzdrovanie dosiek plošných spojov a iných elektronických zostáv. Obe zložky Sylgardu sú navrhnuté tak, aby išli ľahko zmiešať v pomere 10: 1, vzniknutá zmes má viskozitu 3500cP a ľahko aj za normálneho tlaku tečie a zateká aj pod drobné elektronické súčiastky. U náročných dielov je možné použiť vákuové zalievanie. Výhodou Sylardu 184 je okrem iného aj to, že má dobré dielektrické vlastnosti, rýchle a všestranné spracovanie vytvrdzovanie ovládané teplotou. Vysoká transparentnosť umožňuje jednoduchú kontrolu komponentov, je ľahko opraviteľný, je použiteľný v širokom rozsahu teplôt od -55 ° C do +200 ° C a má vynikajúcu ochranu proti vonkajšiemu prostrediu[11].

Technická špecifikácia Sylgardu 184 je nasledujúca[12]:

Výrobca:	DowCorning
Maximálna doporučená prevádzková teplota	200 ° C
Počiatočná viskozita	5100 cP
Viskozita zmesi	3500 cP
Farba	číra
Tvrdosť Shore A	43Shore A
Chemické zloženie	silikón

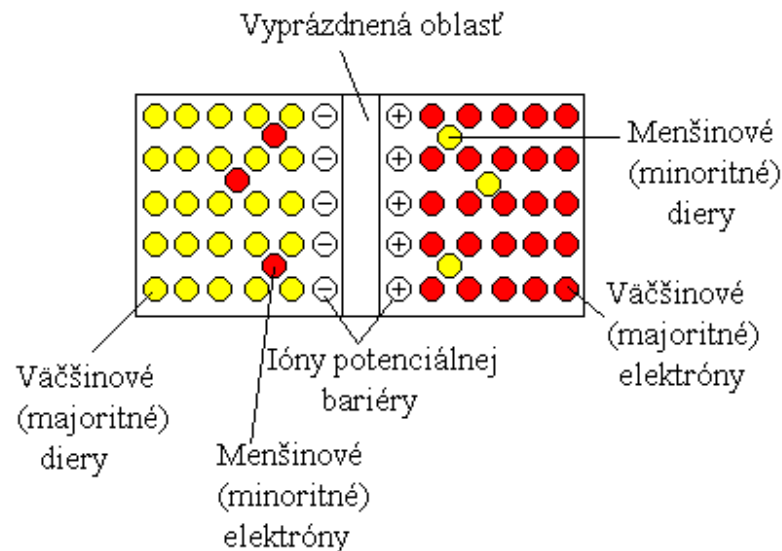
Sylgard 184 sa používa aj ako ochranný povlak pre LED osvetlenie, napájacie zdroje, transformátory, snímače, senzory, zosilňovače a konektory na dosky plošných spojov SMD so súčiastkami SMT a spájkovaných olovnatými SnPb aj bezolovnatými, leadfree, spájkami pri spájkovaní na vlne, reflow technológií či pri spájkovaní v parách [13].

2 LED Dióda

Elektroluminiscenčná dióda alebo svetelná dióda (LED light-emitting diode) je polovodičová elektronická súčiastka vyžarujúca úzko spektrálne svetlo, v tom prípade ak ňou prechádza v priepustnom smere elektrický prúd. Svietiaci jav vzniká následkom žiarivej rekombinácie elektrónovo-dierového páru a je formou elektroluminiscencie. Farba vyžarovaného svetla závisí od štruktúry PN priechodu aj od použitého materiálu[14].

2.1 PN priechod

Polovodič sa skladá z atómov kremíka (Si). Ak sa použijú štyri atómy kremíku a ako piaty prvok sa použije atóm bóru (B) vzniká vodivosť typu P, nakoľko atómy kremíku majú na valenčnej vrstve 4 elektróny a bór ich má len tri, čiže jeden elektrón chýba a vytvorí sa tak virtuálny náboj (diera). Vodivosť typu N vzniká za pomoci štyroch atómov kremíku a ako piaty atóm použijeme fosfor (P), ktorý má na valenčnej vrstve päť elektrónov, preto má jeden elektrón „naviac“. Keď tieto dva materiály spojíme hneď vedľa seba tak dôjde k rekombinácii a voľné elektróny z typu N prechádzajú do vodivosti typu P, kde elektróny chýbajú a dióda je vodivá (viď Obr.6) [15].



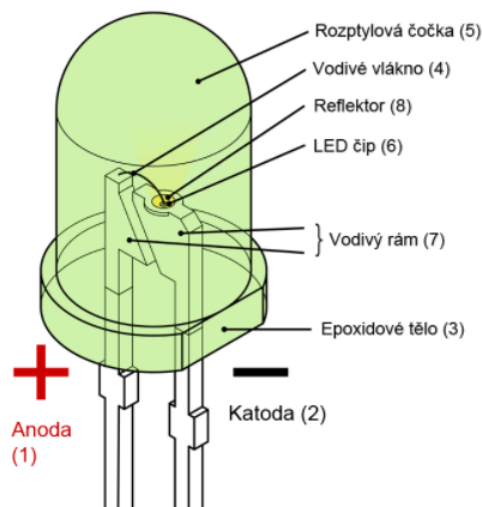
Obr.6: PN priechod, ľavá polovica typ P, pravá polovica typ N
Zdroj: Hockicko, 2018

2.2 Charakteristika LED diódy

Svetelná dióda, nazývaná aj elektroluminiscenčná dióda, je polovodičová súčiastka obsahujúca PN priechod, cez ktorý ak preteká elektrický prúd, emituje optické žiarenie [16].

2.2.1 Opis LED diódy

Cez anódu (1) je privedený kladný náboj vodičom do vlákna (4) LED diódy. Druhá časť je pripojená k vodivému rámu (7), ktorý vedie z katódy (2) k zápornému pólu. Farba vyžarovaného svetla závisí od chemického zloženia LED čipu (6). Rozptyľová šošovka (5) rozptyľuje svetlo do okolia. LED svetlo je celé v epoxidovej živici a má nasledujúce funkcie: dovoľuje maximálny priechod svetla, usmerňuje uhol, pod ktorým chceme, aby sa svetlo šírilo a chráni LED diódu. Neobsahuje pohyblivé časti a vďaka zapuzdreniu je skoro nezničiteľná a veľmi spoľahlivá (viď Obr.7) [17].



Obr.7: Zloženie diódy
Zdroj: 123LED, 2018

2.2.2 Druhy LED diód

Existuje viacero druhov LED diód, ktoré používajú rôzne časti elektromagnetického spektra. Z toho dôvodu majú aj rôzne využitie, či konštrukčné vlastnosti [18].

Ultrafialové (UV) LED sú diódy ktoré majú špičku vyžarovacieho diagramu pod 390nm (viď Obr.8). Táto LED technológia má voľné patenty, dosahuje výkon nad 10mW, ale kvôli bezpečnostným dôvodom sú pre širokú verejnosť zakázané. Najviac používané sú s vlnovým rozsahom 320 – 370 nm, pričom sa používa napríklad pri testovaní pravosti bankoviek [18].



Obr.8: Ultrafialová LED
Zdroj: Hellas digital, 2018

Infračervené (IR) LED diódy využívajú časť elektromagnetického spektra s vlnovou dĺžkou nad 780 nm (viď Obr.9). Ľudské oko nie je schopné vidieť žiarenie s vlnovou dĺžkou nad 800 nm, človek je voči infračervenému žiareniu imúnny. Z toho dôvodu môže IR dióda dosahovať výkony vyššie ako

10mW. Najčastejšie sa používajú tieto diódy s vlnovými dĺžkami 870 – 950 nm. Najčastejšie sa IR dióda využíva v diaľkových ovládačoch[18].



Obr.9: Infračervená LED
Zdroj: Power light system, 2018

Jednofarebné (monochromatické) LED diódy sú charakteristické najmä tým, že sú vyrobené z jedného druhu polovodiča, pričom má len jednu výkonovú špičku (viď Obr.10). Využívajú minimálne 90% žiarivého výkonu. Spektrálna krivka vyžiareného svetla má v ich prípade tvar Gaussovej krivky[18].



Obr.10: Jednofarebné LED
Zdroj: Technovade, 2018

RGB LED (Red-Green-Blue) dióda sa skladá z troch monochromatických LED, ktoré žiaria vo farbách RGB (viď Obr.11). Dióda je výnimočná tým, že je možné regulovať jednotlivé monochromatické zložky a dosiahnuť tak celé spektrum farieb[18].



Obr.11: RGB LED
Zdroj: Kpciot, 2018

Laserové diódy v publikácii Lasery a moderní optika sú charakterizované nasledovne: „Polovodičový laser je laser, ktorého funkcia je založená na vzniku stimulovanej emisie optického žiarenia v polovodičoch“. Oproti iným LED diódam laserové diódy majú vyššie nároky na parametre (viď Obr.12). Šírka pásma týchto diód je pomerne úzka, vyžarujú max. ± 5 nm [19].



Obr.12: Laserová dióda
Zdroj: KPC, 2018

2.3 Elektromagnetické spektrum

Celé elektromagnetické spektrum sa skladá zo žiarení: gama žiarenie, röntgenové žiarenie, ultrafialové žiarenie, viditeľné spektrum, infračervené žiarenie, rádiové vlny.

2.3.1 Viditeľné spektrum

Viditeľné spektrum je časť elektromagnetického spektra, ktoré má žiarenie s vlnovými dĺžkami od 380 nm do 780 nm. Zdola je ohraničené ultrafialovým žiarením a zhora infračerveným žiarením. Ľudské oko vníma farebnosť predmetov na princípe odrazu svetla, čo znamená, že ak má pozorovaný predmet žltú farbu, tak povrch predmetu pohltí všetky vlnové dĺžky okrem žltej farby. Špeciálne farby sú biela a čierna. Pri bielej farbe predmet nepohltí výraznejšie žiadnu konkrétnu vlnovú dĺžku. Čierna naopak pohltí väčšinu vlnových dĺžok. Na tabuľke 1 vidíme jednotlivé vlnové dĺžky a k nim priradené farby[20].

Viditeľná farba	Vlnová dĺžka [nm]
fialová	380-420
modrofialová	420-450
modrá	450-480
modrozelená	480-510
zelená	510-550
zelenožltá	550-570
žltá	570-590
oranžová	590-600
oranžovočervená	600-630
červená	630-750
tmavočervená	750-780

Tabuľka 1: Farba odpovedajúcej vlnovej dĺžke
Zdroj: Schubert, 2006

2.4 Farebná teplota

Farebná teplota sa udáva v jednotkách Kelvin (značka K). Táto jednotka sa najčastejšie vyskytuje na žiarovke, žiarivkových trubiciach, LED žiarovkách, LED páskach, úsporných žiarovkách. Dôvodom je, že tieto produkty sa vyrábajú v rôznych farebných teplotách. Synonymom farebnej teploty je teplota chromatickosti opisujúca spektrum bieleho svetla (viď Obr.13). Je to farba svetla, ktorú svetelný zdroj vyžaruje. Čím je nižšia hodnota v Kelvinoch, tým svetlo viac pôsobí, že svieti do žltá. Na druhú stranu, čím je číslo vyššie, svetlo pôsobí, že svieti do modra[21].



Obr. 13: Stupnica teploty chromatickosti

Zdroj: Svet svetidiel, 2018

2.4.1 Rozdelenie farby bieleho svetla

Farby bieleho svetla sa rozdeľujú na teplú bielu, bielu, studenú bielu, RGB. Teplá biela farba (2800K - 3500K) sa podobá svetlu, ktoré vyžaruje sviečka alebo oheň. Odtieň svetla je skôr dožltá. Používa sa v priestoroch, kde sa človek často zdržuje, napr. obývacia izba, kúpeľňa, relaxačné miestnosti, detská izba a iné. Biela (4000K - 5000K) farba, inak nazývaná aj „denná“ alebo „neutrálna biela“, sa najviac podobá k žiareniu denného svetla. Tento odtieň farby svetla sa používa napr. v pracovných priestoroch, kúpeľniach, verejnom osvetlení a iné. Studená biela farba (5500K - 6500K) je ostrejšia, je to biele svetlo, ktoré sa odráža do modra. Unavuje oči, preto ju nie je dobré používať v priemyselných aplikáciách, avšak používa sa na miestach, kde svetlo prechádza matným difúzorom, ktorý zreteľne znižuje oslnenie napr. pri výrobe drobných predmetov. Za pomoci Red, Green, Blue (RGB) v preklade červená, zelená, modrá farba je možné namiešať akúkoľvek inú farbu. RGB LED dióda má tri anódy, každú inej farby a jednu katódu preto s jedinou diódou je možné dosiahnuť akúkoľvek farbu zo spektra[17].

2.5 Voltampérová charakteristika diódy

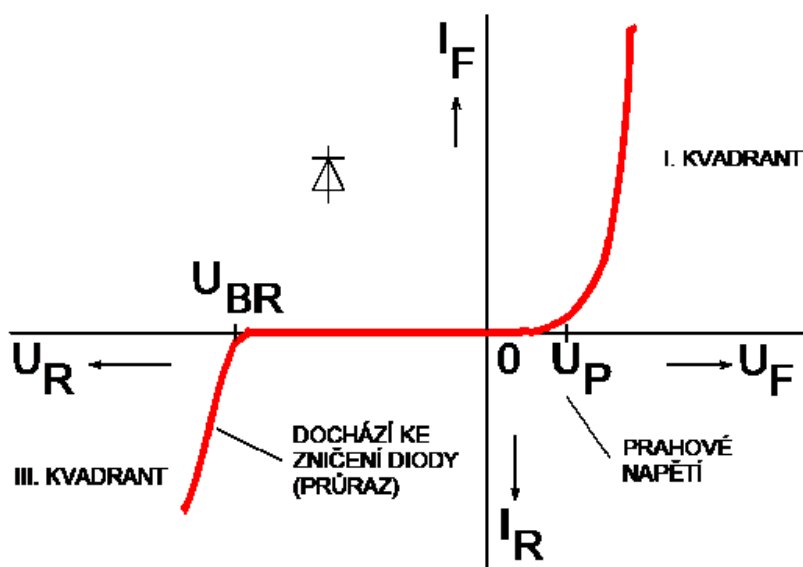
Voltampérová charakteristika diódy (ďalej len „VA“) poskytuje základné informácie o vlastnostiach polovodičových diód. VA je závislosť jednosmerného prúdu prechádzajúceho cez diódu na pripojenom jednosmernom napätí (DC). V priepustnom smere je dióda otvorená (1. kvadrant), naopak v závernom smere je dióda zatvorená (3. kvadrant). Až po dosiahnutí napätia U_{BR} dochádza k deštruktívnym procesom v polovodičovom materiáli a dióda sa zničí[22].

Napätie U_P je prahové napätie v priepustnom smere, pri ktorom cez diódu začína prechádzať prúd ($U_F > U_P$) a pri ktorom pripojené vonkajšie napätie, prekoná difúzne napätie diódy a zničí potenciálnu priehradu. V priepustnom smere má dióda veľmi malý odpor (záleží na typu použitej diódy - stotiny až jednotky ohmov), pričom anódové napätie (napätie medzi anódou a katódou, úbytok napätia na dióde) je asi 1 V[22].

VA poskytuje základnú informáciu o vlastnostiach diódy, pričom je to závislosť jednosmerného prúdu prechádzajúceho diódou od jednosmerného napätia, ktoré pôsobí medzi anódou A a katódou K. Na charakteristike vidíme dve oblasti. Oblasť, v ktorej je dióda otvorená - polarizovaná v priamom smere - 1. kvadrant. A oblasť, v ktorej je dióda zavretá - polarizovaná v nepriamom smere - 3. kvadrant. Anódový prúd začína prechádzať pri napätí $U_{AK} > U_{TO}$, čiže prúd v priamom smere začne prechádzať až vtedy, keď napätie vonkajšieho zdroja zruší potenciálovú bariéru (viď Obr.14). Prahové napätie U_{TO}

zodpovedá difúznemu napätiu na priechode a závisí od materiálu diódy a teploty. Pri Ge je pri $+25^{\circ}\text{C}$ asi 0,2 V, pri Si asi 0,56 V[23].

Cez diódu v závernom smere prechádza veľmi malý až zanedbateľný prúd. Vonkajšie pripojené napätie totiž prechod úplne uzavrie, prúd je tvorený iba minoritnými nosičmi náboja. Odpor diódy je rádovo v stovkách kiloohmov až desiatok megaohmov. Ak dosiahne dióda záverné napätie U_R (záleží na typu diódy môže byť aj niekoľko sto voltov) dôjde k prudkému nárastu záverného prúdu (intenzita elektrostatického poľa dosahuje veľkú intenzitu, že dochádza k vytrhávaniu elektrónov z väzieb medzi atómami a celkovo k ionizácii kryštálovej mriežky) a nastáva proces ktorý diódu zničí. Ionizácie môžu byť nedeštruktívne (po znížení napätia sa obnovia funkcie diódy) alebo deštruktívne, pričom dochádza k trvalým (nezvratným) zmenám v kryštálovej mriežke (dióda je zničená, nastane tzv. prieraz)[23].



Obr.14: Voltampérová charakteristika diódy

Zdroj: Elektronika I učebnice, 2009

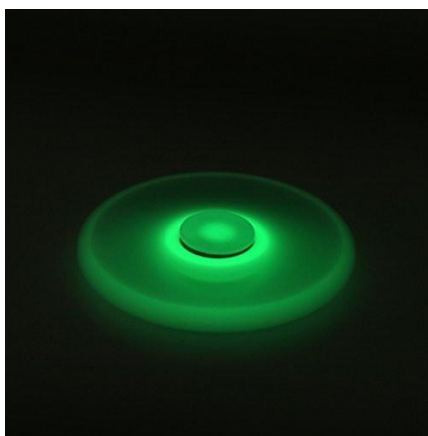
3 Luminofory

Luminofor je látka, u ktorej nastáva jav zvaný luminiscencia (tzv. svetielkujúca látka) [24].

3.1 Všeobecná charakteristika luminoforov

Luminofor je pevná látka, ktorá po osvetlení denným svetlom, UV žiarením, konkrétnou farbou z viditeľného spektra alebo infračerveným žiarením a dokáže túto energiu absorbovať – excitovať. Uchovanú energiu postupne vyžaruje vo forme svetla pomalým uvoľňovaním, pokiaľ sa nenavráti do základného stavu.

Pri uvoľňovaní energie vyžaruje sekundárne žiarenie, nastáva luminiscencia, ktorá sa delí na viacero druhov podľa doby vyhasínania. Prvým druhom je **fluorescencia**, kde po dokončení excitácie (pod 10^{-8} s) žiarenie veľmi rýchlo zaniká. Fluorescencia sa prejavuje svetielkovaním látok pri ich osvetlení. Najčastejšie sa vyskytuje v molekulových a atómových plynách. Ďalším druhom je **fosforescencia**, ktorá je pomalý zánik luminiscencie. Fosforescencia trvá dlhšie, aj po dokončení excitácie (nad 10^{-8} s, môže aj niekoľko dní) (viď Obr.15)[24].



Obr.15: Fosforescencia
Zdroj: Forled, 2018

Luminofory môžu z chemického hľadiska obsahovať najmä oxidy, sulfidy, sírany alebo aj kremičitany zinku, kadmia, bária, stroncia, horčíku, vápniku a ďalších prvkov, prevažne kovov. Aktivátormi sa najčastejšie používajú vzácne kovy - zlato, striebro, meď, ich zmesi a zlúčeniny[25].

3.2 História luminoforov

Slovo fosfor pochádza z gréčtiny, svetlo „*fós*“ a nesiem „*fero*“, preto tento prvok nazvali phosphorus. V roku 1669 ho objavil alchymista H. Brandt v Hamburgu zahrievaním moču s pieskom, pričom na výrobu 120 gramov fosforu bolo potrebných približne 5500 litrov moču. V roku 1743 A. S. Marggraf začal pracovať na novej metóde výroby fosforu, konkrétne z apatitu (názov pre skupinu fosforečnanov vápenatých s cudzím aniónom), do ktorého pridával kremeň a koks, pričom tento spôsob výroby sa používa v súčasnosti[26].

V roku 1903 William Crookes objavil dnes najstarší a najrozšírenejší luminoforzvaný Sulfid zinočnatý najčastejšie aktivovaný prísadou (ZnS:Cu) [26].

3.3 Teplota chromatickosti

Je farba bieleho svetla. Tento parameter vychádza zo žiarovky pri ktorej sa vlákno zohreje na 2500K (Kelvinov). Tento parameter sa následne prevzal na určovanie farby bieleho svetla aj keď už nepopisuje teplotu svetleného zdroja ale prejav farby svetla [20].

3.3.1 Kolorimetria

Kolorimetria je veda o farbe, ktorá hodnotí a kvantifikuje farby a je prepojená s ľudským farebným videním. Kolorimetria je: „veda a technológia používaná k fyzikálnej kvantifikácii a opisu ľudského vnímania farieb“[27]. Táto veda získala veľký záujem, ktorý trval počas mnohých storočí, pričom dôvodom jej vzniku je rozdielne vnímanie ľudí zmyslami či už zvukových alebo optických podnetov. Zmiešavaním dvoch monochromatických optických signálov ľudské oko vníma ako jednu farbu a nedokáže rozpoznať pôvodné dischromatické zloženie tejto farby [20].

3.3.2 Štandard CIE, 1931

Svetlo môže byť budené rôznymi úrovňami červenej, zelenej a modrej farby (RGB). Svetelný zdroj sa líši u každého jednotlivca, čo vyplýva z jeho pocitu farby a svetelného toku. Pocit farby je vnímaný do určitej miery ako subjektívne množstvo. Na základe týchto dôvodov Medzinárodná komisia pre osvetlenie (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) vytvorila štandard na meranie farby pomocou prispôbenia farieb funkcie a diagram chromatickosti [28]. Hodnoty funkcií jednotlivých farieb RGB zobrazuje Obr. 16. Následne sa merané funkcie zhody farieb matematicky premenia do novej sady funkcií adekvátnej k farbe, pre ktoré je zelená funkcia zhody farieb $y(\lambda)$ zvolená tak, aby bola totožná s funkciou citlivosti na oko, $V(\lambda)$, t.j.:

$$y(\lambda) = V(\lambda)$$

Za pomoci troch funkcií zhody farby vieme potvrdiť, že ľudské farebné videnie má trichromáciu, čiže možnosť opísať akýkoľvek zdroj svetla za pomoci len troch premenných a zároveň premenné $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ a $z(\lambda)$ sú bezrozmerné veličiny. Podľa Schuberta (2006): „Pri danej výkonovej spektrálnej hustote $P(\lambda)$ je potrebný stupeň stimulácie, aby zodpovedal hodnote farba $P(\lambda)$ je daná tým, kde X, Y a Z sú hodnoty, pre jednotlivé farebné stimuly, ktoré poskytujú stimuláciu (t.j. výkon) každého z troch hlavných svetiel červené, zelené a modré potrebné na zodpovedanie farby $P(\lambda)$. Veľké hodnoty hodnôt X, Y, a Z označujú červené, zelené a modré farby spektra $P(\lambda)$ “.

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

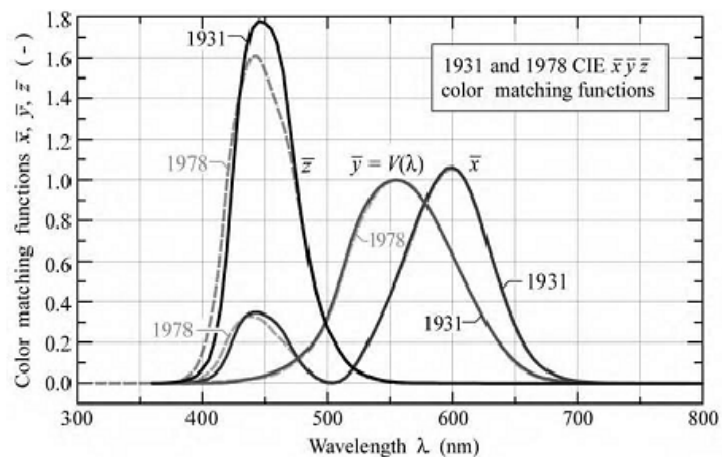
$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

Chromatické súradnice x a y sa vypočítajú z hodnôt farebných stimulov X, Y a Z podľa vzťahov:

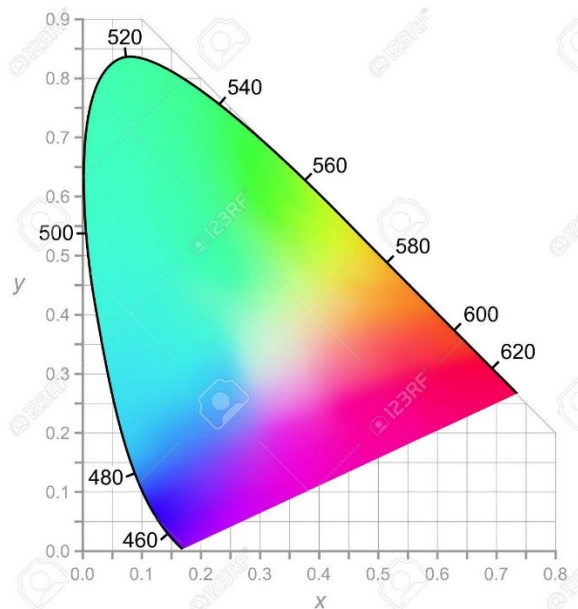
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$



Obr.16:Hodnoty jednotlivých funkcí RGB
Zdroj: Schubert, 2006

Následne vypočítané hodnoty (súradnice) x , y prenesieme do diagramu chromatickosti(vid'. Obr.17) a získame výslednú farbu [20].



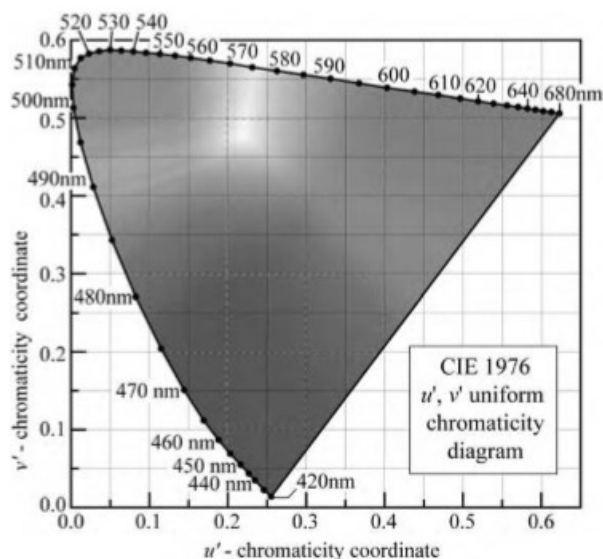
Obr. 17:Diagram chromatickosti
Zdroj: 123rf, 2018

3.4 Korelovaná teplota farby

Farba a teplota medzi sebou priamo nekorelujú. Vzťah je však odvodený od Planckovho čierneho telesného žiariča. S rastúcimi teplotami svieti červená, oranžová, nažltlá biela, biela a nakoniec modrastá biela. Farebná teplota (CT) zdroja bieleho svetla, vyjadrená v jednotkách kelvinu, je teplota planckého čierneho telesného žiariča, ktorá má rovnakú farbu ako zdroj bieleho svetla.

Ak farba zdroja bieleho svetla nespadá do planckého miesta, použije sa korelovaná teplota farby (CCT), ktorá sa tiež uvádza v jednotkách kelvinu. Korelovaná teplota farieb zdroja bieleho svetla je definovaná ako „teplota planckého čierneho telesa, ktorého farba je najbližšia k farbe zdroja bieleho svetla“ [20].

Korelácia teploty farby svetelného zdroja sa určuje nasledovne. Na rovnomernom chromatickom diagrame (u' , v') (viď Obr.18) sa určuje bod na planckom mieste, ktorý je najbližšie k chromatickej polohe svetelného zdroja (t.j. najkratšia geometrická vzdialenosť). Korelovaná teplota farby je teplota planckého čierneho telesa v tomto bode. Na chromatickom diagrame (x , y) nemôže byť korelovaná teplota farby určená pomocou použitia najkratšej vzdialenosti k planckému miestu v dôsledku nerovnomernosti (x , y) diagramu chromatickosti [29].

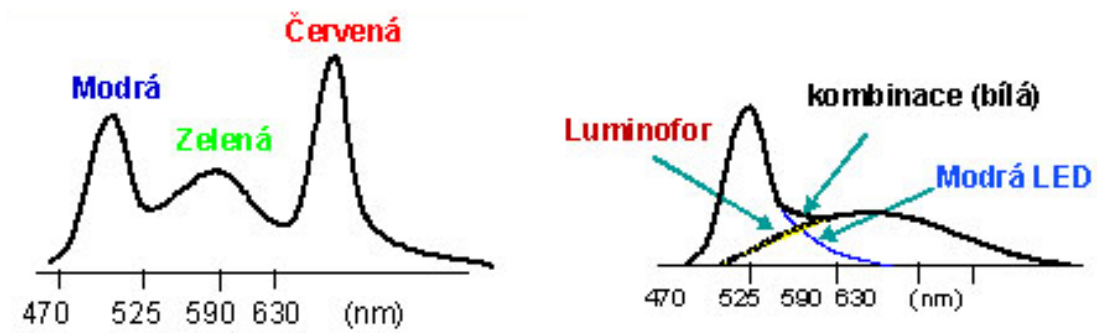


Obr. 18: CIE 1976 (u' , v') jednotný diagram chromatickosti
Zdroj: Schubert, 2006

Je veľmi dôležité, aby bol rozdiel farieb úmerný geometrickému rozdielu. Preto CIE v roku 1976 predstavila (u' , v') jednotné chromatické súradnice. V chromatickom diagrame (x , y) sa nerovnomerne mení farba napr. v smere x sa mení rýchlejšie oproti smeru y . Vďaka (u' , v') jednotnému diagramu chromatickosti je tento efekt znížený, no nie úplne odstránený. Vzťah výpočtu u' , v' zo súradníc x , y je nasledovný:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$



Obr. 20: Spôsoby vzniku bieleho svetla
Zdroj: Úsporná žiarovka, 2018

4 Vlastné meranie

Prvým krokom bolo vyrobiť vzorky z čistého Polydimethylsiloxanu, ktorý slúži ako matrica, na ktorej bude zmes Polydimethylsiloxan a luminoforu v rôznych pomeroch.

4.1 Postup výroby vzoriek

Na výrobu vzoriek sme použili Polydimethylsiloxan (PDMS). Konkrétne na vzorky bol použitý Silicone Elastomer Sylgard 184 od firmy Dow Corning. Tento PDMS je dodávaný ako dvojzložkový, pričom jedna zložka je vytvrdzovacie činidlo. Materiál má v datasheete uvedený pomer týchto dvoch komponentov 10:1 pre ideálne vytvrdenie a zachovanie žiaducich optických vlastností materiálu. Pomer môžeme mierne upraviť, ak by sme chceli dosiahnuť rýchlejšie alebo pomalšie vytvrdenie. To však môže mať za následok zmenu optických vlastností a to je pre nás nežiadúce. Musíme brať na vedomie, že aj teplota a vlhkosť ovplyvňujú vo veľkej miere dobu vytvrdzovania.

4.1.1 Príprava matrice z PDMS

Prvým krokom bolo pripraviť zmes. Zmes bola namiešaná z dvoch zložiek Sylgardu 184, základná zložka : vytvrdzovacie činidlo v pomere 10:1. Bolo veľmi dôležité aby sa nedostalo vytvrdzovacie činidlo do nádoby so základovou zložkou Sylgardu 184, taktiež ani zložka Sylgardu 184 do nádoby s vytvrdzovacím činidlom. V tom prípade by došlo ku znehodnoteniu základovej zložky alebo činidla.

Pripravili sme si laboratórnu váhu KERN PCB 8000-1, na ktorú sme položili čistú kadičku. S injekčnou striekačkou sme opatrne nabrali základnú zložku Sylgardu 184 z nádoby a podľa váhy sledovali koľko silikónu je v kadičke. Na vytvrdzovacie činidlo sme použili plastovú pipetu a za sledovania váhy pridávali činidlo z pipety pokiaľ sme nedosiahli pomer 10:1.

Zmes bolo potrebné dôkladne premiešať aby sa zložky spojili. Miešali sme ju za pomoci plastovej pipety približne 3 minúty. Tento spôsob miešania spôsobil, že do zmesi sa dostal vzduch, ktorý vytvoril malé bublinky, čo by malo nežiaduci dopad na meranie. Zmes sme rozliali do ôsmich kadičiek kruhového tvaru s priemerom 3 cm a ôsmich skúmaviek. Pre odstránenie vzduchových bublín sme vložili všetky vzorky do chladničky s teplotou približne 10 °C na 2 hodiny. Chlad spomalil proces vytvrdzovania a urýchlil odvzdušnenie bublín.

Odvzdušnené vzorky v kadičkách sme vložili do pece na 60 minút pri teplote 70 °C pre urýchlienie doby vytvrdzovania. Vzorky v skúmavkách boli pripravené na pridanie luminoforu.

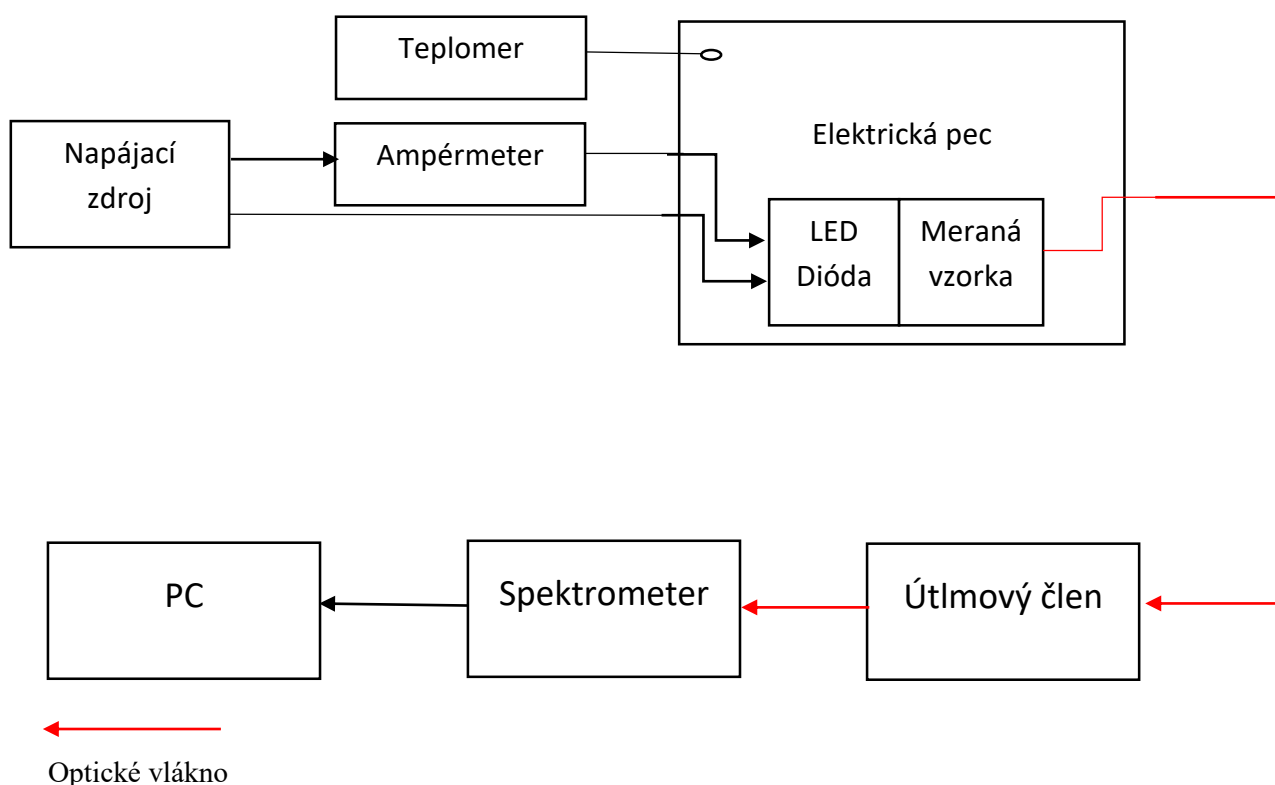
4.1.2 Príprava vzoriek luminoforu na PDMS podklade

Použili sme luminofor s obchodným označením QMK58/F-U2 od firmy Phosphor Technology Ltd. Jedná sa o yttrito-hlinitý granát dopovaný cérom, čo je žltý luminofor, ktorý má chemický vzorec $Y_3Al_5O_{12}:Ce$. Potrebovali sme vytvoriť osem vzoriek v rôznych koncentráciách. Do pripravených skúmaviek so zmesou PDMS sme pridali luminofor v hmotnostnom pomere luminofor: PDMS: 1:5;1:10;1:15;1:20;1:25;1:30;1:35. Keďže sa jedná o látku, ktorá obsahuje toxické kovy, váženie s pomocou laboratórnej váhy KERN PCB 8000-1 a následne presypanie luminoforu do skúmaviek prebiehalo v uzavretom priestore tzv. „akváriu“. Takto nachystané skúmavky sme umiestnili do špeciálnej laboratórnej miešačky, kde proces miešania trval 3 hodiny. Po premiešaní PDMS s luminoforom sme jednotlivé skúmavky vyliali do pripravenej kadičky s PDMS podkladom. Tieto kadičky sme opäť vložili do pece na 60 minút pri teplote 70 °C pre urýchlienie doby vytvrdzovania. Po tomto čase bola vzorka pripravená na meranie. Hmotnosť matrice čistého PDMS je 5g a hmotnosť

vrstvičky zmesi je 3g čistého PDMS plus jednotlivé pomery luminoforu. Hrúbka luminiscentčnej vrstvy bola 2 mm.

4.2 Meracia sústava

Druhým krokom bolo navrhnutie a zostavenie meracej sústavy (viď. Obr.21) na ktorej sme merali jednotlivé vyrobené vzorky z prvého kroku (Príprava vzorky).



Obr. 21: Bloková schéma zapojenia

4.2.1 Použité prístroje

Všetky vzorky boli merané rovnakým postupom a rovnakými prístrojmi, ako vidíme (viď. Obr.21) blokovej schémy zapojenia.

Napájací zdroj

Ako napájací zdroj sme použili zdroj od firmy Statron typ 2229, ktorý má vstupné parametre 230VAC 50Hz regulovateľné výstupné napätie 0 – 40V a zároveň regulovateľný výstupný prúd od 0 až po maximum 2,5 A poskytuje lineárnu reguláciu CV = constant voltage (konštantný zdroj napätia) a skratu vzdorné CC = constant current (konštantný zdroj prúdu). Odolá vyšším pracovným teplotám 0 – 350 °C.



Obr. 22: Napájací zdroj Statron
Zdroj: Statron, 2018

Multimeter

Multimeter od firmy UNI-T typu UT70B, sme používali ako ampérmeter. Preto boli pre nás dôležité parametre, ktoré sa týkali prúdu (viď. Tabuľka 2).

Rozsah merania prúdu DC	0,4m/4m/40m/400m/10A
Presnosť merania prúdu DC	$\pm(1\% + 2 \text{ číslice})$
Rozsah merania prúdu AC	0,4m/4m/40m/400m/10A
Presnosť merania prúdu AC	$\pm(1,5\% + 5 \text{ číslic})$

Tabuľka 2: Parametre multimetru UNI-T typu UT70B



Obr. 23: Multimeter UT70B
Zdroj: Tme, 2018

Teplomer

Na meranie teploty sme použili profesionálny teplomer značky DT-613 od firmy CEM (vid'. Obr.24), na ktorom sa dá pracovať pri teplotách $0 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez kondenzácie s presnosťou merania $0,5^{\circ}\text{C}$ a teplotným rozsahom $-50 +1300^{\circ}\text{C}$.



Obr. 24: Teplomer DT-613

Zdroj:GM elektronik, 2018

Elektrická pec

Prístroj, kde sme merali a zahrieval vzorky bola elektrická pec značky Concept. S nastaviteľnou teplotou, časovačom a tichým chodom 50 dB.



Obr. 25: Elektrická pec

Zdroj: Concept, 2018

LED dióda

Modrá LED dióda s označením OSUB5111P, ktorou sme svietili do vyrobených vzoriek má tieto parametre (vid'. Tabuľka 3).

Priemer	5 mm
Svietivosť	15000 mcd
Vyžarovací uhol	15 °
Farba	modrá
Typ šošovky	číra
Dĺžka vlny	470 nm

Tabuľka 3: Parametre LED diódy s označením OSUB5111P



Obr. 26: LED dióda s označením OSUB5111P

Zdroj:Elfax, 2018

Optické vlákno

Optickým vláknom bolo prenášané vzniknuté biele svetlo do útlmového člena a z útlmového člena do spektrometra. Na toto sme použili optické vlákno od spoločnosti THORLABS, konkrétne M45L02 s priemerom vlákna $\varnothing 400 \mu\text{m}$ a nasledujúcimi parametrami 0.50 NA, SMA-SMA Fiber Patch Cable, Low OH, s dĺžkou 2 metre.



Obr. 27: Optické vlákno M45L02

Zdroj:Thorlabs, 2018

Spektrometer

Od spoločnosti OceanOptics spektrometer typu USB4000. Tento prístroj bol pripojený k osobnému počítaču a za jeho pomoci zaznámenaval farbu bieleho svetla. Parametre tohto spektrometru môžeme vidieť v nasledujúcej tabuľke (viď. Tabuľka 4).

Pixelov	3648
Rozsah detektorov	200-1100 nm
Veľkosť pixelov	8 μm x 200 μm
Hĺbka vrstiev pixelov	100,000 elektrónov
Tmavý šum	50 RMS
Optické rozlíšenie	$\sim 0,1$ až 10,0 nm FWHM
Dynamický rozsah	$3,4 \times 10^{-6}$ (systém); 1300: 1 pre jednu akvizíciu
Doba integrácie	3,8 ms - 10 sekúnd

Tabuľka 4: Parametre spektrometru OceanOptics USB4000



Obr. 28: Spektrometer USB4000

Zdroj: OceanOptics, 2018

Útlmový člen

Útlmový člen s držiakmi od spoločnosti Thorlabs, ktorý môžeme vidieť (viď. Obr.29) s nasledujúcimi parametrami (viď. Tabuľka 5).

Minimálny útlm	≤ 2 dB
Maximálny útlm	≥ 20 dB
Minimálne dosiahnutie pohybu	≤ 0.1 dB

Tabuľka 5: Parametre útlmového členu



Obr. 29: Útlmový člen spolu s držiakom je to fotka tak neviem
Zdroj: Thorlabs, 2018

Osobný počítač

Ako posledný prístroj bol osobný počítač, na ktorý sme nainštalovali software SpectraSuite. Tento program fungovalo ako rozhranie zo spektrometrom.

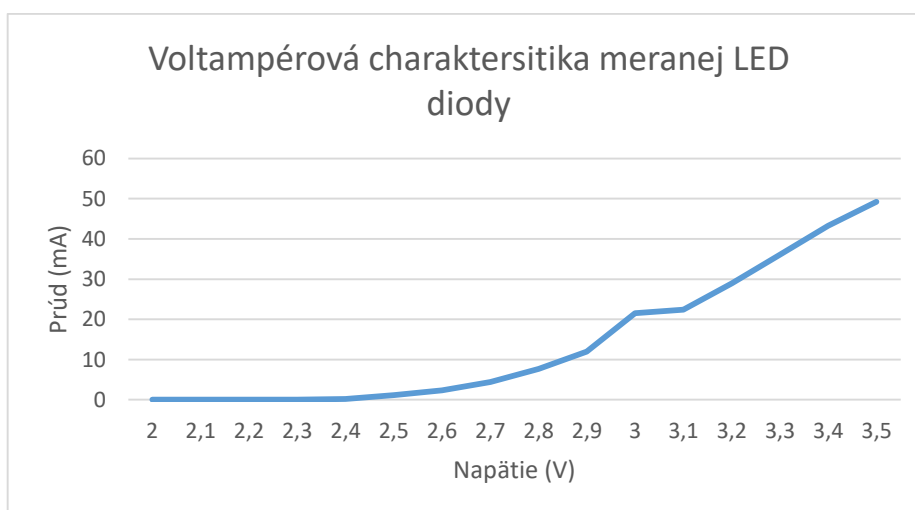
4.3 Postup merania

V tejto kapitole popíšeme ako sme postupovali pri meraní jednotlivých vzoriek, ale aj diódy za pomoci hore uvedených prístrojov.

4.3.1 Postup merania LED diódy

Na meranie sme použili modrú LED diódu označenú OSUB5111P. Premerali sme si na nej tieto vlastnosti: spektrum, voltampérovú charakteristiku pri pokojovej teplote, závislosť výkonu od napätia pri pokojovej teplote, závislosť prúdu a výkonu od stúpajúcej teploty.

Meranie voltampérovej charakteristiky pri pokojovej teplote prebiehalo nasledovne. Na napájacom zdroji sme nastavili počiatočnú hodnotu napätia na 2 V a postupne sme pridával po 0,1 V až po hodnotu 3,5 V. Celkovo teda prebehlo 16 merní. Jednotlivé hodnoty prúdu a výkonu sme odčítavali z multimetra ako môžeme vidieť na nasledujúcich obrázkoch (viď. Obr.30 a Obr.31).



Obr. 30: Graf voltampérovej charakteristiky

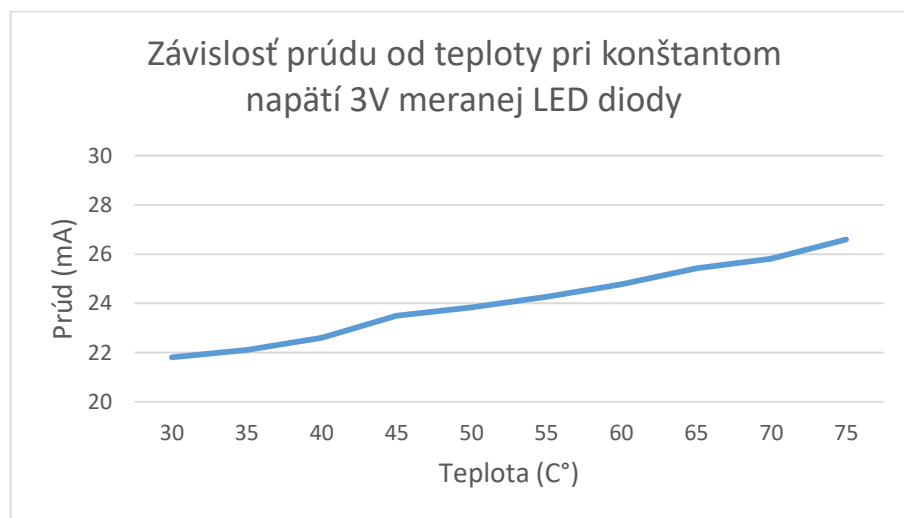


Obr. 31: Graf závislosti výkonu od napätia

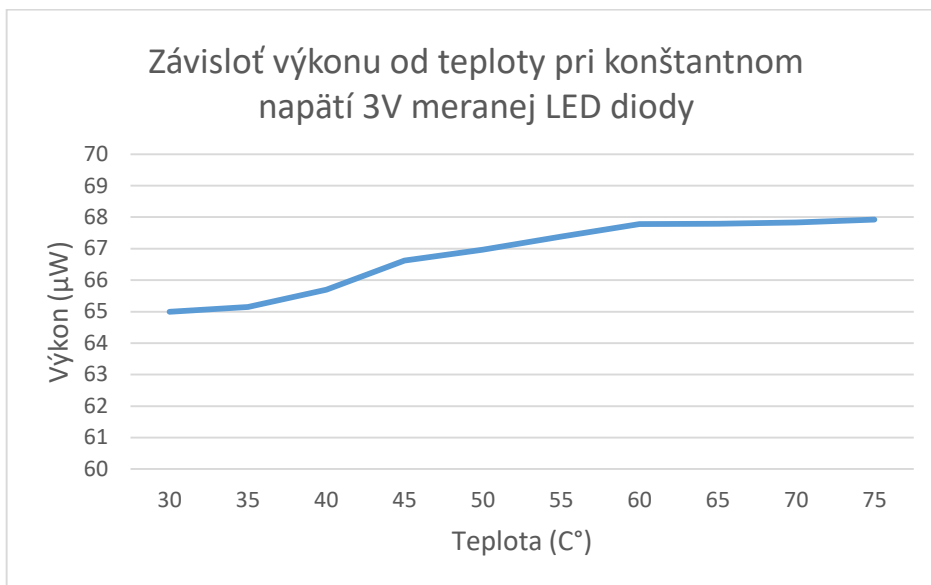
Vidíme, že dióda začala prepúšťať prúd a teda aj výkon pri hodnote napätia 2,4 V. Meranie prebehlo pri pokojovej teplote.

V ďalšom kroku sme merali závislosť prúdu a výkonu od zvyšujúcej sa teploty pri konštantnom napätí 3 V. Na zdroji sme teda nastavili už spomínanú hodnotu 3 V. LED diódu sme vložili do elektrickej pece, kde sme vložili aj meracie čidlo z teplomera. Pomocou multimetra sme odčítavali hodnoty prúdu a výkonu a zároveň sme sledovali teplomer kedy odčítať hodnoty z multimetra. Prvú hodnotu sme odčítali pri 30 °C a potom každých 5 °C až po 75 °C. Na obrázkoch (viď. Obr.32 a Obr.33), vidíme, že s rastúcou teplotou rastie aj prúd tečúci cez diódu a zároveň sa zvyšuje aj výkon danej LED diódy. Z toho vyplýva, že vnútorný odpor diódy sa mierne znižuje s rastúcou teplotou, a pri konštantnom privedenom napätí 3 V sa prúd pretekajúci cez LED diódu mierne zvyšuje.

Urobili sme malé pozorovacie meranie, vďaka ktorému sme zistili, že mierne vplyvy zmeny prúdu LED diódy skoro nemajú žiadny vplyv na zmenu hodnoty CCT meraného vzorku a preto sme tento vplyv v ďalších meraniach zanedbali.



Obr. 32: Graf závislosti prúdu od teploty



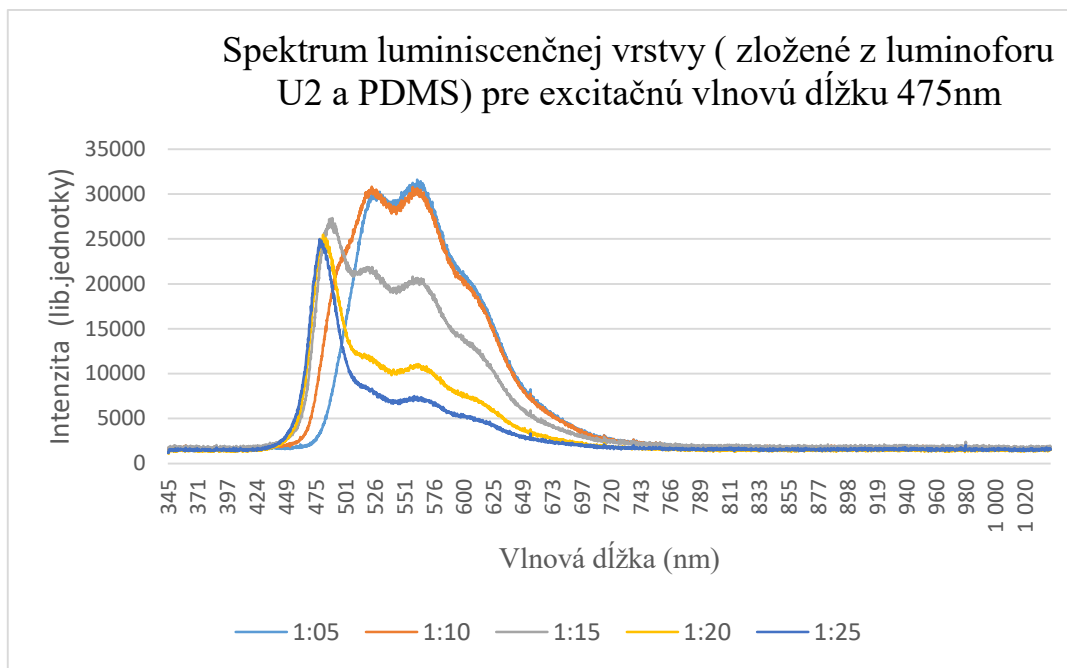
Obr. 33: Graf závislosti výkonu od teploty

Posledným krokom bolo odmerať reálne vyžarovacie spektrum pri pokojovej teplote. Na napájacom zdroji sme nastavili 3 V. LED diódu sme umiestnili do špeciálneho krytu, kde vyžarovala svetlo (aby nevyžarovala svetlo do priestoru) a za diódu sme pripevnili optické vlákno, ktoré bolo privedené do spektrometra. A zo spektrometra dátovým káblom do osobného počítača. Za pomoci softwaru SpectraSuite sme zistili, že skutočná vlnová dĺžka je 475 nm.

4.3.2 Postup merania spektra luminiscenčnej vrstvy

V tomto kroku sme merali spektrum luminiscenčnej vrstvy našich vzoriek, ktoré boli budené modrou LED diódou s vlnovou dĺžkou 475 nm.

Meranie prebehlo v pokojovej teplote. Na napájacom zdroji sme si nastavili napätie 3 V. Zdroj napájal modrú LED diódu, ktorá bola umiestnená v špeciálnom kryte spolu s meranou vzorkou (aby budiace svetlo svietilo len do vzorky a nie do okolitého prostredia). Modrá LED svieti do vzorky a za vzorkou sa vytvára biele svetlo. Z druhej strany tohto krytu bol pripevnený optický kábel, ktorý toto biele svetlo priviedol do útlmového člena a z neho následne do spektrometra. Útlmový člen bol použitý pred spektrometer z toho dôvodu, aby znížil intenzitu bieleho svetla. Pretože privedené biele svetlo optickým káblom malo veľkú intenzitu pre tento konkrétny použitý spektrometer, doba integrácie podľa datasheetu je min. 3,8 ms (čas za ktorý spektrometer zaznamenáva svetlo). Zo spektrometra boli dáta privedené do osobného počítača na ktorom bol nainštalovaný software SpectraSuite, za pomoci ktorého sme merali jednotlivé spektra vzoriek. Toto meranie sme opakovali s každou vzorkou samostatne ktoré mali pomer luminoforu U2 : PDMS – 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:30; 1:35.



Obr. 34: Graf: spektrum luminiscenčnej vrstvy

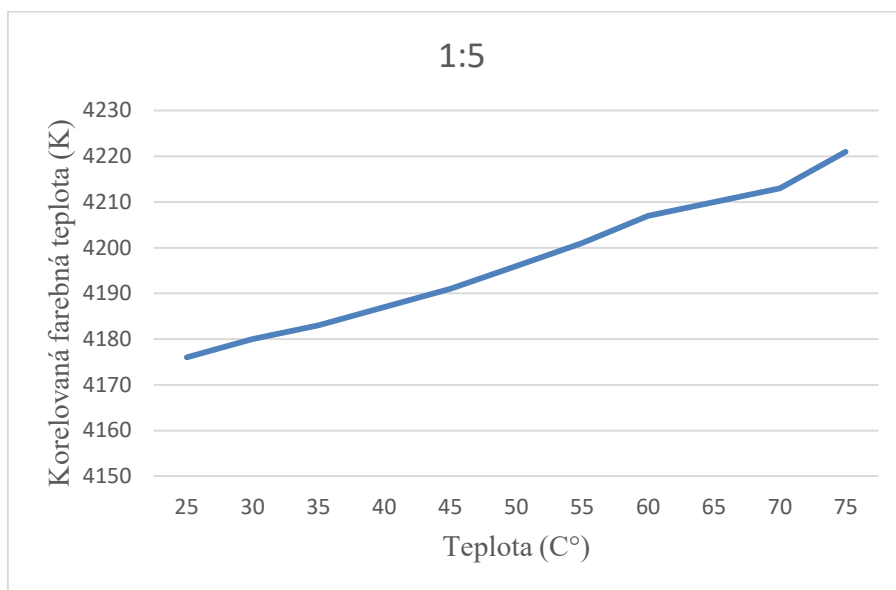
Na obrázku(vid'. Obr.34) je vidieť jednotlivé spektrá meraných vzoriek. Pri vzorkách s väčším obsahom luminoforu teda vzorky 1:05; 1:10; 1:15; 1:20 dochádza k luminiscencii, teda premieňajú modré excitované svetlo na širokopásmovú zložku (žltú zložku), v rozsahu približne 500 -700 nm. A spolu s úzkopásmovou zložkou vytvárajú biele svetlo. Pri vzorkách s meším obsahom luminoforu 1:25; 1:30; 1:35; 1:40, nastáva to, že len malá časť z modrého excitovaného svetla sa konvertuje na širokopásmovú zložku (žltú zložku) na druhej strane prevláda úzkopásmová zložka (modrá zložka) v rozsahu 450 – 480 nm. To má za následok, že svetlo je viac do modra. Na grafe niesú zobrazené vzorky 1:30; 1:35; 1:40 kvôli prehľadnosti grafu pretože boli skoro totožné so vzorkou 1:25.

4.3.3 Postup merania bieleho svetla závislého na teplote

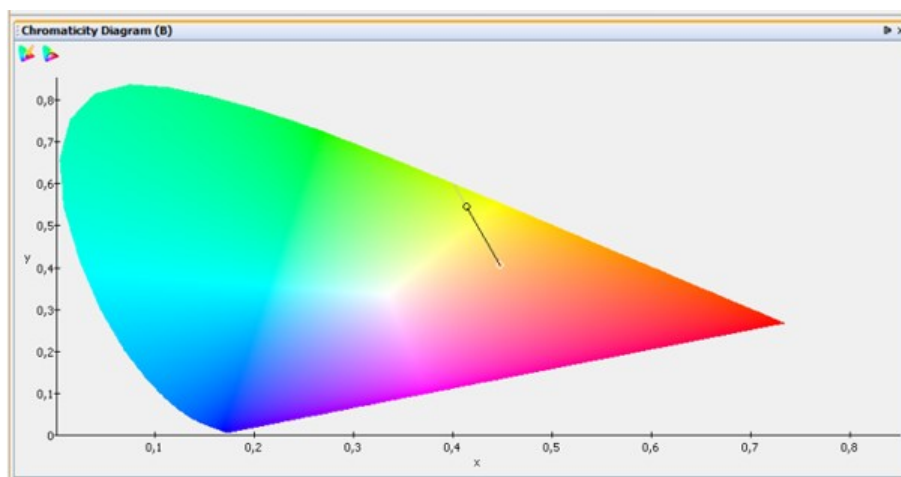
Hlavným cieľom práce bolo odmerať ako ovplyvňuje teplota farbu bieleho svetla a to pri rôznych koncentráciach luminoforu. Použili sme nato následovný postup. Na napájacom zdroji sme nastavili napätie 3 V. Do elektrickej pece sme umiestnili čidlo teplomera spolu s nameranou vzorkou, ktorá bola umiestnená v špeciálnom kryte spolu s budiacou modrou LED diódou. LED dióda bola napájaná zo zdroja. Vzniknuté biele svetlo, ktoré vzniklo svietením modrej LED diódy do vzorky bolo prenášané pomocou optického kábla do útlmového členu a odtiaľ do spektrometru. A zo spektrometra do osobného počítača, kde sme mali nainštalovaný software SpectraSuite s ktorým sme merali jednotlivé hodnoty CCT (korelovaná farbná teplota). Začali sme vzorkou 1:5. Vložili sme ju do elektrickej pece a pec nahriali na 75 °C . Po dosiahnutí 75 °C sme pec vypoli a nechali ju samovoľne vychladzovať. Každých 5°C sme zaznamenávali hodnotu CCT až po teplotu 25 °C. Keďže hodnota CCT stále trochu kolísala bola meraná pri danej teplote za pomoci softwaru SpectraSuite 100krát. Neskôr sme tieto hodnoty spriemerovali. Po dosiahnutí 25 °C sme zaznamenávali aj diagram chromatickosti danej vzorky. Tento postup sme opakovali s každou vzorkou.

4.3.4 Vzorka 1:5

Táto vzorka obsahovala najväčšie množstvo luminofora zo všetkých našich vzoriek. Veľká časť excitačnej modrej zložky sa premenila na žlté svetlo, kde spolu s modrým svetlom vytvorili biele svetlo nádychom do žltá ako vidíme na chromatickom diagrame (viď. Obr.36). Meraná vzorka pri teplote 25°C mala hodnotu CCT 4176 K (kelvinov). Postupne ako sme vzorku zahrievali pôsobil na luminofor takzvaný efekt vyhasínania luminiscencie. Čo znamená, že pri vyššej teplote sa premení menšia časť excitovanej modrej zložky na žltú farbu. Vidíme to aj na obrázku (viď. Obr.35), že pri teplote 75 °C je hodnota CCT 4221 K.



Obr. 35: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:5

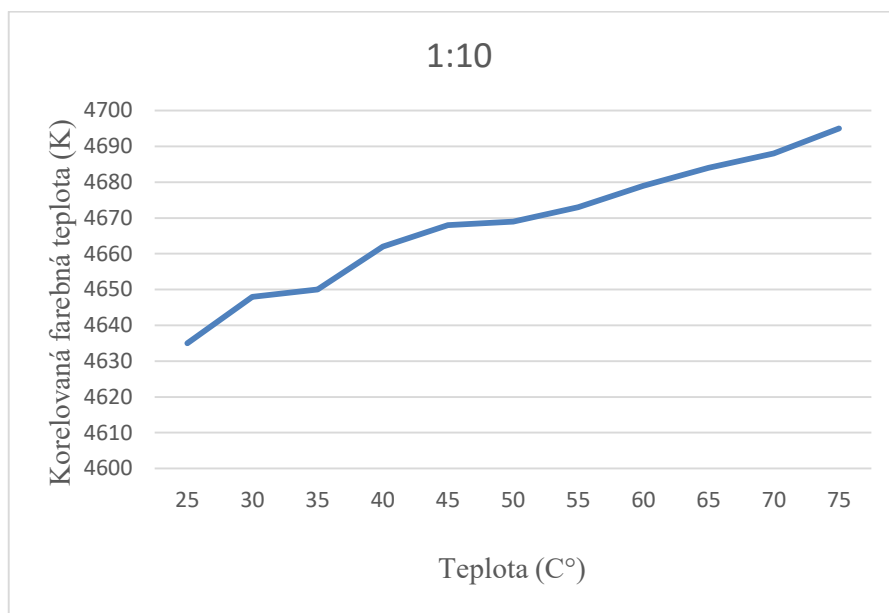


Obr. 36: Diagram chromatickosti vzorky 1:5

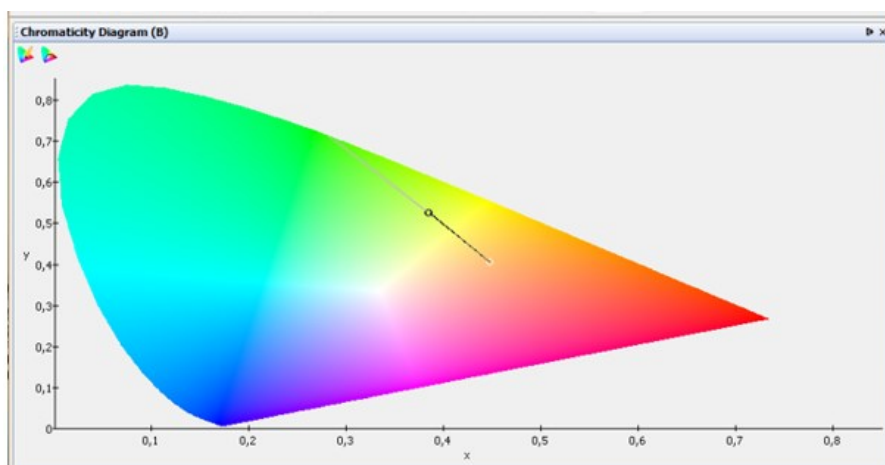
4.3.5 Vzorka 1:10

Vzorka 1:10 oproti predchádzajúcej vzorke obsahuje menšie množstvo luminoforu. To zapríčinilo, že počiatočná hodnota CCT pri 25°C je 4635 K a keďže platí efekt tepelné zhášanie luminiscencie tak

pri teplote 75°C je hodnota CCT 4695 K (viď. Obr.37).Stále však môžeme hovoriť o podobnej farbe svetla ako u predchádzajúcej vzorky, čiže biele svetlo s nádychom do žltá ako nám zobrazuje čierny krúžok (viď. Obr.38).



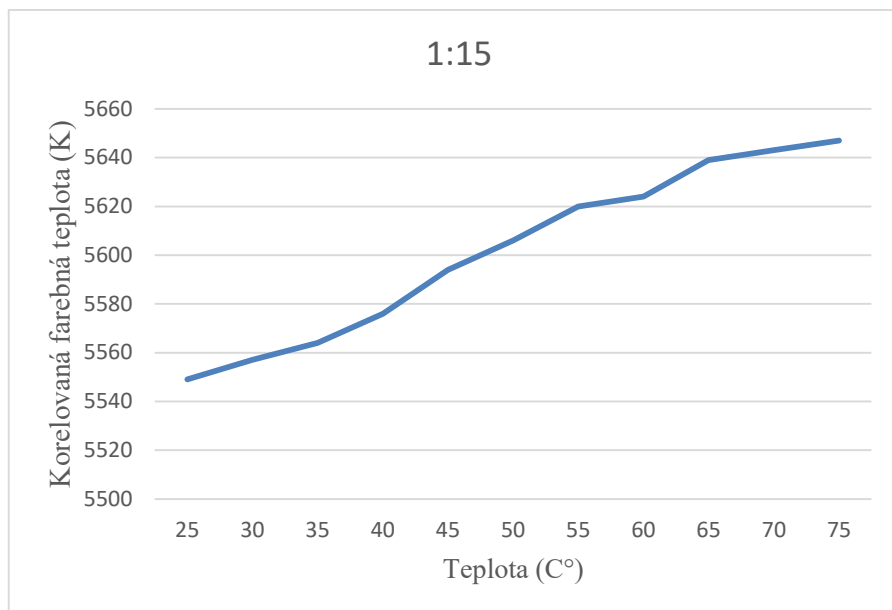
Obr. 37: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:10



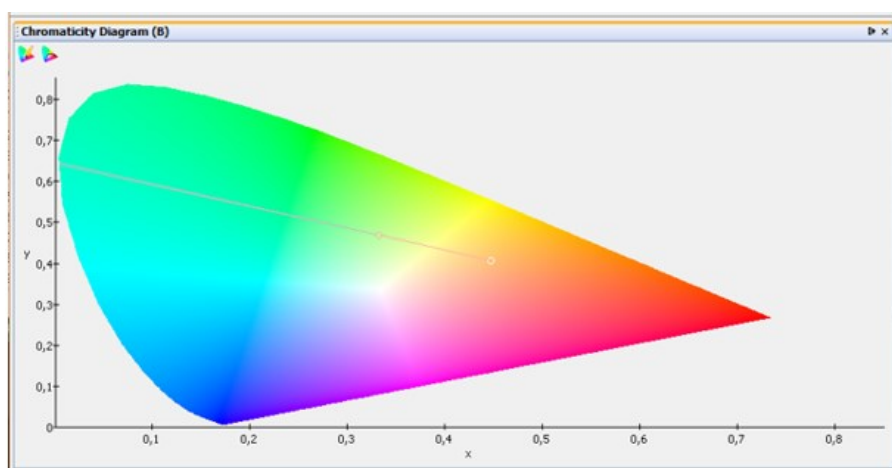
Obr. 38: Diagram chromatickosti vzorky 1:10

4.3.6 Vzorka 1:15

Ako môžeme vidieť na obrázku (viď. Obr.40) pri vzorke s pomerov 1:15 začína mať biele svetlo nádych do modra. K tomu svedčia aj namerané hodnoty ktoré sú pri 25 °C 5549 K a pri 75 °C 5647 K (viď. Obr.39). Tomuto rozpätiu farby sa hovorí „studená biela“.



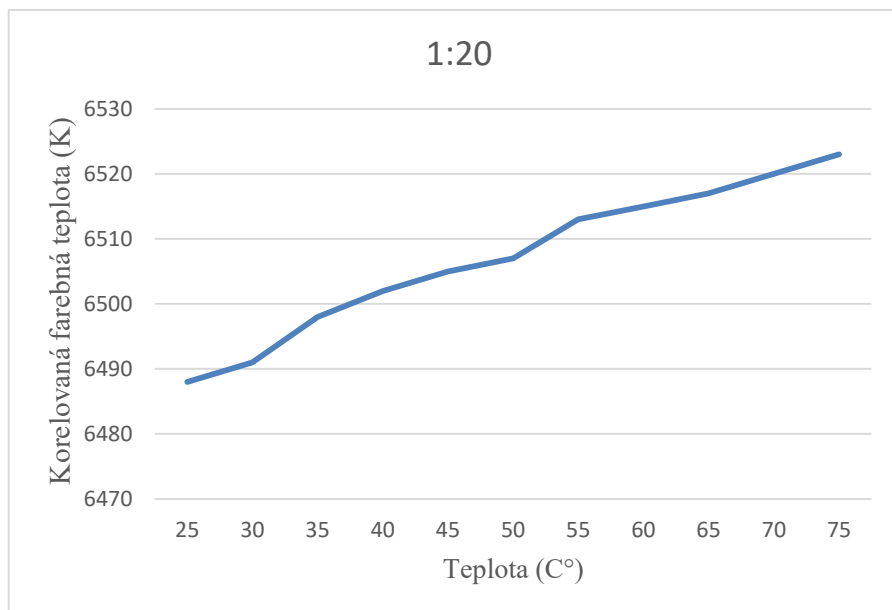
Obr. 39: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:15



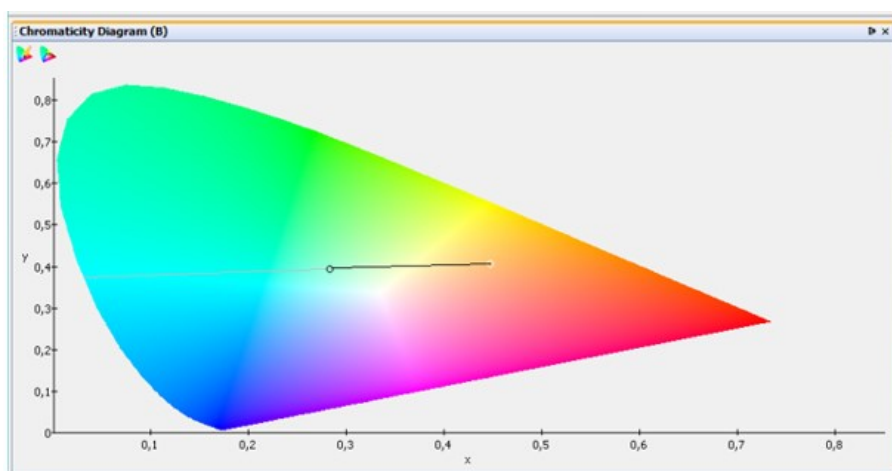
Obr. 40: Diagram chromatickosti vzorky 1:15

4.3.7 Vzorka 1:20

Na obrázku (vid'. Obr.42) vidíme, že farba bieleho svetla sa zvýšila. Oproti vzorke 1:15 je trošku viac do modra ale stále môžeme hovoriť o bielom svetle. Hodnoty pri 25 °C 6488 K a pri 75 °C 6523 K, ktoré môžeme sledovať (vid'. Obr.41).



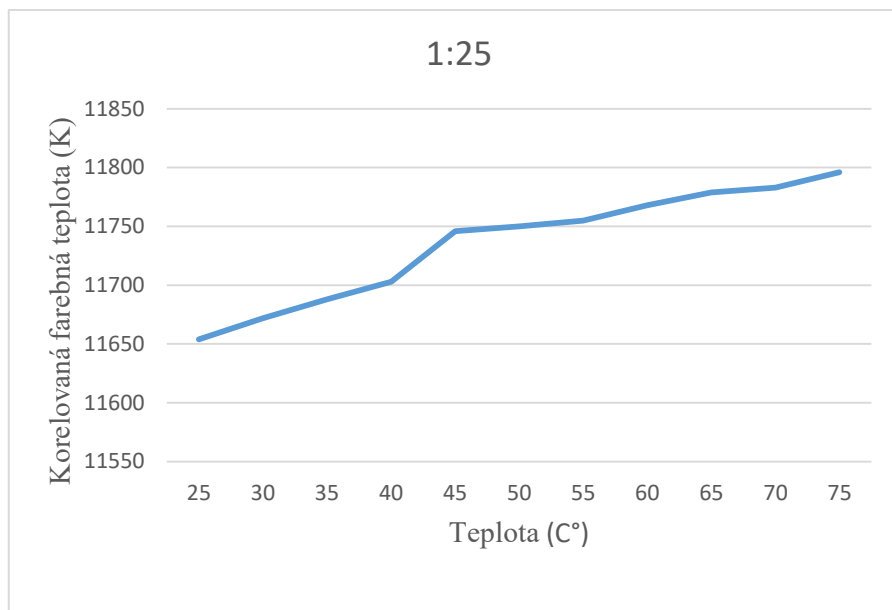
Obr. 41: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:20



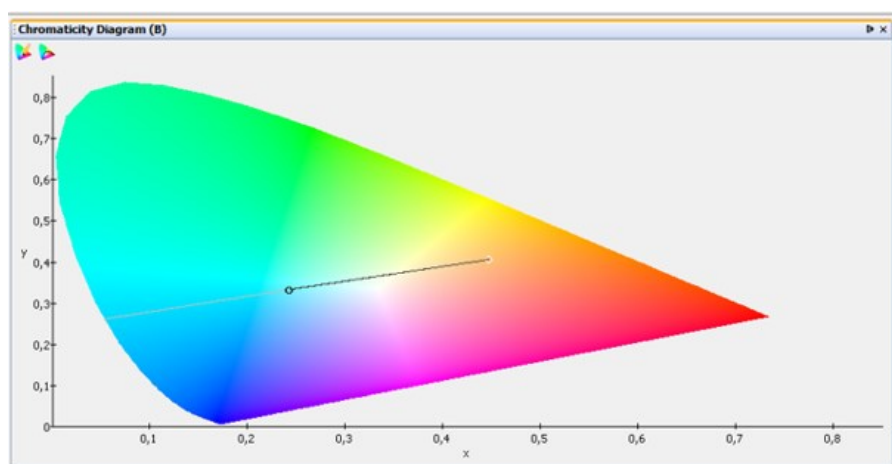
Obr. 42: Diagram chromatickosti vzorky 1:20

4.3.8 Vzorka 1:25

U tejto vzorky môžeme povedať, že hraničí z hodnotou bieleho svetla. Keď sa pozrieme na obrázok (vid'. Obr.44) vidíme, že svetlo je modrasté. K tomu nasvedčujú aj hodnoty pri 25 °C 11654 K a pri 75 °C 11796 K, videné na obrázku (vid'. Obr.43).



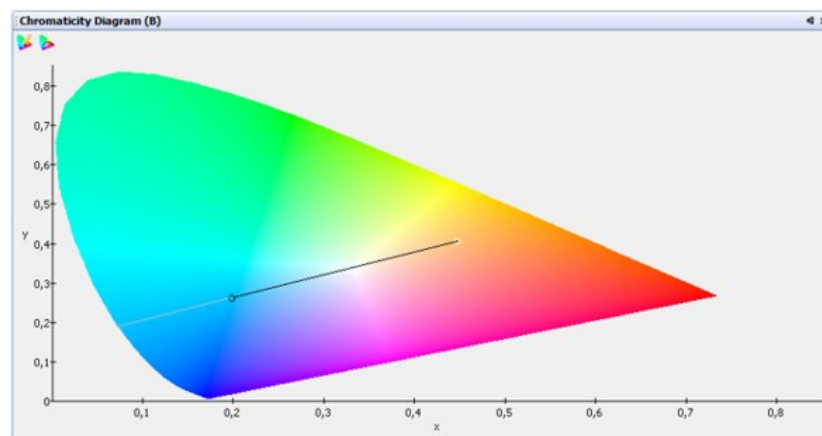
Obr. 43: Graf korelovanej farebnej teploty vzorky 1:25



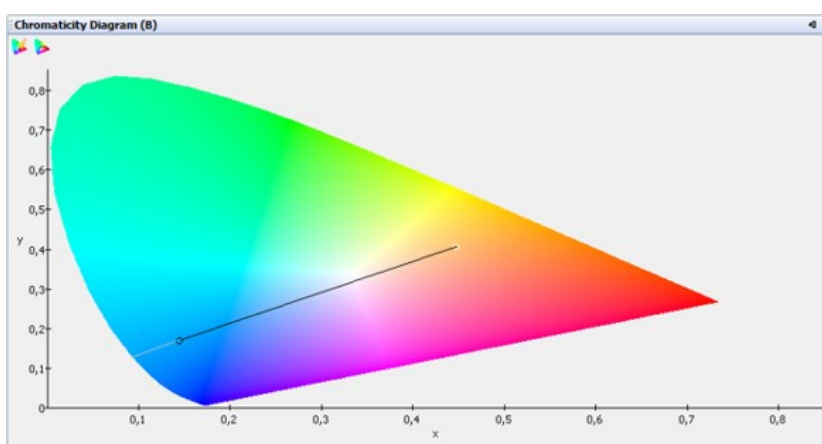
Obr. 44: Diagram chromatickosti vzorky 1:25

4.3.9 Vzorky 1:30; 1:35; 1:40

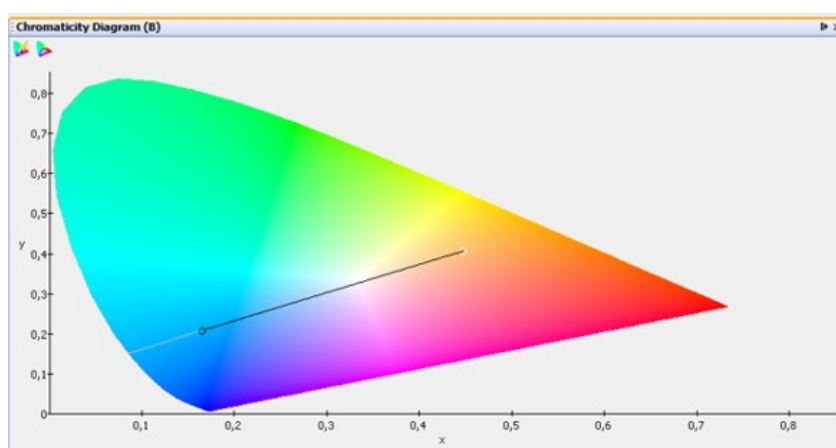
Tieto vzorky obsahujú veľmi malé množstvo luminoforu. To má za následok, že len veľmi malá časť modrého excitačného svetla sa premení na širokopásmové žlté svetlo. Preto v týchto vzorkách vo výslednom spektre prevláda modrá excitačná zložka svetla a preto je hodnota CCT vysoká. Čím je hodnota CCT vyššia tým je biele svetlo viac do modra. A keď modrá zložka výrazne vo spektre prevažuje potom je hodnota CCT nenamerateľná (undefined). Keď sa pozrieme naobrázky (viď. Obr.45, Obr.46, Obr.47), skutočne je to modrastá farba.



Obr. 45: Diagram chromatickosti vzorky 1:30



Obr. 46: Diagram chromatickosti vzorky 1:35



Obr. 47: Diagram chromatickosti vzorky 1:40

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zistiť akým spôsobom sa prejaví vplyv koncentrácie luminoforu v PDMS a vplyv zmeny teploty luminiscenčnej vrstvy na spektrálne charakteristiky svetla generovaného touto vrstvou pri budení konkrétnou modrou LED diódou. Ako sa konkrétne prejavia tieto vplyvy na zmenu hodnoty CCT.

Meraním sme zistili, že pre všetky dané vzorky platí tzv. efekt „tepelného zhášania luminiscencie“. Znamená to, že pri zvyšujúcej sa teplote luminofor premení menšiu časť modrej excitačnej zložky, čo znamená, že pre rôzne koncentrácie luminoforu v PDMS a pre našu konkrétnu LED diódu sú rôzne hodnoty CCT pri pokojovej teplote oproti teplejšiemu prostrediu. So stúpajúcou teplotou vzorky (so stúpajúcou teplotou luminiscenčnej vrstvy) rastie aj hodnota CCT svetla generovaného touto vrstvou a vo výslednom spektre je svetlo viac modrasté. Výsledky tejto práce je možné využiť pri návrhu zdroja bieleho svetla založeného na modrej budiacej LED a skúmanej luminiscenčnej vrstve, kedy sme schopní odhadnúť a nastaviť výslednú CCT tohto svetelného zdroja. Ďalšie možné využitie sa ponúka v teplotných senzorických aplikáciách, kde zo zmeny hodnoty CCT môžeme usudzovať zmenu teploty luminiscenčnej vrstvy a jej bezprostredného okolia a v prípade vedomostí porovnávacích referenčných meraní môžeme túto teplotu (vzorky-luminiscenčné vrstvy) priamo určiť.

Prínosom tejto práce bolo zistenie, že pre konkrétne luminiscentčné vrstvy, ktoré sme použili pri budení konkrétnou modrou LED diódou s vlnovou dĺžkou 475 nm, vznikalo vhodné spektrum pre biele svetlo. Najlepšou vzorkou pre biele svetlo bola vzorka 1:15, ktorá vykazovala hodnotu CCT od 5549 K do 5647 K závislé od teploty. Podľa tohto ju môžeme nazvať aj „studená biela“. Môžeme tu zaradiť aj vzorku 1:20, avšak tá už hraničí s modrastou farbou svetla. Vzorky 1:5 a 1:10 sa podľa hodnoty CCT radia do kategórie „denná“ alebo „neutrálna biela“. Pri ostatných vzorkách 1:25; 1:30; 1:35 a 1:40 je koncentrácia luminoforu taká malá, že svetlo môžeme považovať za modré.

V budúcnosti je možné v práci pokračovať a preskúmať napr. iné koncentrácie (1:8; 1:12; 1:17 a iné). Taktiež sa dá použiť aj iný luminofor a celý postup práce s ním zopakovať a následne porovnať výsledky, prípadne merať spektrum a CCT pri vyšších teplotách ako bolo merané v tejto práci 75 °C a vyššie. Taktiež je možné použiť inú LED diódu s inou vlnovou dĺžkou.

Použitá literatura

- [1] JONES, Richard G. Compendium of polymer terminology and nomenclature: IUPAC recommendations, 2008. Cambridge: IUPAC, c2009. ISBN 0854044914.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] NEMCOVÁ, A. – KHANDL, F.: Spájanie plastov. Bratislava: WELDTECH, 1998. ISBN 80-88734-18-5.
- [4] Merna, Jan. Polymery-úvod [PDF document] <http://merna.eu/wp-content/uploads/2017/03/Polymery-uvod.pdf>. citované 20.6.2018
- [5] Prokopová I.: Makromolekulární chemie. 2nd ed. Praha : VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80 7080-662-3
- [6] DOLEŽAL, Vladimír. Plastické hmoty. Praha: SNTL –Nakladatelství technické literatury, 1977. ISBN L16-B2-IV-41/61849.
- [7] HEMMELOVÁ, Svatava. Síťování a degradace polymerních filmů pomocí UV ozařování. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014, 83 s. (78 231 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/28677>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Sedlačík, Michal.
- [8] Reaktoplasty [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [9] MLEZIVA, J. a J. ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-[24]
- [10] VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS) [online]. 2016 [cit. 2018-06-28]. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2016. Vedoucí práce: Šiška, Petr.
- [11] PolydimethylsiloxanSylgard 184 [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.ellsworth.com/products/by-market/consumer-products/encapsulants/silicone/dow-corning-sylgard-184-silicone-encapsulant-clear-0.5-kg-kit/>
- [12] Technická špecifikáciaSylgardu 184 [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <http://elchemco.cz/webar.cz/zbozi/25/sylgard-182-a-184>
- [13] Sylgard 184 [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/761028?lang=en®ion=SK>

- [14] HABEL, Jiří, a kol. Světlo a osvětlování. Praha : FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3. Kapitola Elektroluminiscenční světelné zdroje, s. 201–214.
- [15] Charakteristika LED diódy [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
<http://remote-lab.fyzika.net/experiment/04/experiment-4-teorie.php?lng=cs>
- [16] DVOŘÁČEK, V.: Světelné zdroje – halogenidové výbojky (část 2). Světlo, 2009.
- [17] Rozdelenie farby bieleho svetla [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
<https://www.123led.sk/farby-svetla/>
- [18] Druhy LED diód [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
<http://www.uspornaziarovka.sk/pages/Typy-LED.html>
- [19] VRBOVÁ, Miroslava. Lasery a moderní optika. Praha: Prometheus, 1994. Oborová encyklopedie. ISBN 80-85849-56-9.
- [20] SCHUBERT, E. Fred. Light-Emitting Diodes. Second edition. New York : Cambridge University Press, 2006. 422 s. ISBN-10 0-511-34476-7.
- [21] Farebná teplota [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
<https://www.svet-svietidiel.sk/novinky/detail/farebna-teplota.htm>
- [22] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. VYTVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137, Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009.
- [23] Voltampérová charakteristika diódy [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
http://www.spslevice.sk/ucebnice/elektronika/3_2_1_dioda.htm
- [24] JURŠÍK, František. *Anorganická chemienekovů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2001. ISBN 80-7080-417-3.
- [25] Kricka, Larry J. (2003), *Optical Methods: A Guide to the "Escences"*, American Association for Clinical Chemistry, p. 110, ISBN 1890883913.
- [26] CORBRIDGE, Derek. *Phosphorus 2000 - chemistry, biochemistry&technology*. Amsterdam: Elsevier, 2000. ISBN 0-444-82550-9.
- [27] Schanda, János D. (1997). "Colorimetry"(PDF). In Casimer DeCusatis. *Handbook of Applied Photometry*. OSA/AIP. pp. 327–412. ISBN 978-1-56396-416-9.

- [28] Štandard CIE, 1931 [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
https://www.123rf.com/photo_62145891_stock-vector-cie-chromaticity-diagram-describes-color-as-seen-by-the-human-eye-in-full-daylight-two-dimensional-d.html
- [29] Duggal, [ED. BY] ZAKYA KAFABI. Organic electroluminescence. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC, Taylor & Francis, 2005. ISBN 9780819458599.
- [30] Encyklopedický ústav SAV. EncyclopaediaBeliana (A-Belk). I. vyd. Banská Bystrica : Veda, vydavateľstvo SAV a Stredoslovenské vydavateľstvo, a. s., 1999. 1. z 12 zv. (696 s.) ISBN 80-224-0554-X. číslo publikácie 3259. Kapitola A, s. 31.
- [31] Žiarenie absolútne čierneho telesa [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z:
https://www.xrite.com/service-support/please_explain_the_term_black_body_curve.